

高压共轨柴油机喷油控制策略研究

徐劲松¹ 魏亮¹ 吴鸿兵² 陈丛金¹ 陈贵升¹

(1. 昆明理工大学云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500; 2. 北汽福田汽车股份有限公司, 北京 102206)

摘要: 通过对高压共轨柴油机喷油控制的需求分析,发现在转速突变时进气系统具有明显的迟滞性,这种迟滞性表现为进气增量跟不上喷油增量,所设计的转速变化主喷油量修正算法能够重新修正原喷油量,以获得合理的空燃比,改善燃烧过程。多次喷射会造成轨压波动,经过多次喷射轨压波动油量修正算法对喷油量脉宽进行预修正,可以提高喷油执行精度。利用 ETAS 公司的 ASCET 建模软件工具和自主开发的 ECU 电路板,在 YN33CR 型高压共轨柴油机上进行了台架试验。试验结果表明:该喷油控制策略符合预期效果,能够有效改善喷油控制。

关键词: 柴油机; 高压共轨; 喷油控制策略; 油量修正

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0294-07

Injection Control Strategy of High Pressure Common Rail Diesel Engine

Xu Jinsong¹ Wei Liang¹ Wu Hongbing² Chen Congjin¹ Chen Guisheng¹

(1. Yunnan Province Key Laboratory of Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Beiqi Foton Motor Company Limited, Beijing 102206, China)

Abstract: Through analyzing requirements of injection control of high pressure common rail diesel engine, the air intake system had obvious hysteresis in the changing speed. And this kind of hysteretic performance was represented that the increment of the intake-air could not obviously keep pace with the increment of the injection. Thus, the designed correction algorithm of main injection quantity for changing speed could newly modify the original main injection fuel quantity, and obtain the reasonable air-fuel ratio and optimize the combustion process. For the fluctuation of common rail pressure was caused by the multiple injection, the fuel correction algorithm of multiple injection for common rail pressure fluctuation could pre-rectify the fuel injection pulse width and improve the injection accuracy, which were realized by using the ASCET modeling software tools of ETAS company and the independently developed ECU circuit board. After calibration experiment of the engine on YN33CR high pressure common rail diesel engine, such as starting and idling condition test, main injection quantity correction test of changing speed, fuel correction test of multiple injection for rail pressure fluctuation, constant torque and increasing speed mode test, constant speed and increasing torque mode test, the results showed that the fuel injection control strategies achieved the expected results and it can effectively improve the injection control.

Key words: diesel engine; high pressure common rail; injection control strategy; injection quantity correction

引言

多次喷射技术能够优化柴油机功率输出^[1],提

高起动性能^[2-3],改善燃烧和排放^[4-7],降低振动和噪声^[8-9]。然而多次喷射的前一次喷射会产生轨压波动^[10],并影响下一次喷射油量的精确性^[11-12],使

收稿日期: 2015-10-06 修回日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61263026)、云南省教育厅重点基金项目(2014Z025)和昆工校企合作基金项目(KKZ3201402021)

作者简介: 徐劲松(1973—),男,副教授,博士,主要从事柴油机电控技术研究,E-mail: 372606249@qq.com

燃烧不均匀,导致转速波动^[13]。目前的研究主要集中在多次喷射对喷油器硬件特性的轨压波动仿真^[14-16]、喷油速率、喷油量等波动对燃烧的影响^[17-18]、以及针对压电喷油器的预喷引发轨压波动导致主喷油量的波动^[19];在试验研究中也发现了预喷脉宽和轨压增加对主喷油量的波动影响较大^[20],并运用频域法分析了不同负荷对轨压波动的影响^[21],而针对转速变化主喷油量修正和多次喷射造成轨压波动主喷修正的控制策略研究文献较少。

本文针对高压共轨柴油机的喷油控制,提出基于转速变化和轨压波动的喷油量修正及相关控制策略。根据转速变化率对主喷油量进行修正,对喷油量进行预修正,最终通过台架试验验证整个喷油控制策略设计的正确性。

1 喷油需求分析

柴油机的运行工况复杂,其进气系统普遍存在迟滞性,其空燃比变化范围大,只有通过对主喷油量、喷油脉宽的调整才能满足当前工况下柴油机的燃烧需求。此外,不同工况下的多次喷射组合会造成轨压短时波动,却可以获得不同的燃烧效果。在起动及低速时,采用“预喷+主喷”的喷油方式,能

够有效改善柴油机的起动性能及排放性能;在高速高负荷时,预喷的预混燃烧对排放改善的效果不明显^[1],此时为减少 NO_x 和 PM 的排放,降低发动机振动和噪声,可采用“主喷+后喷”的喷油方式。在这种变工况的工作方式下,喷油控制需要具备灵活的可变喷油组合和准确的喷油量计算能力。

2 喷油控制策略

柴油机燃油喷射控制是建立在综合柔性的转矩控制和独立柔性的轨压控制^[22]基础之上的,按照工况需求的喷油组合,对总喷油量进行分配,并在适当的时刻将其逐次喷入各个气缸,使得各缸内的燃烧效果最佳。

喷油控制的总架构如图 1 所示。由扭矩控制模块把总需求扭矩经过“扭矩-油量”MAP 换算成总需求油量,再确定喷油组合方式,即:根据当前发动机转速、各次喷射的释放条件,确定初始喷射组合,并按照硬件执行要求及工况设计要求对初始喷射组合进行最小喷射次数限制和优先级管理,从而获得最终的喷油组合方式。最后,把总需求油量逐个分配给各次喷射,并计算喷油提前角。其中,主喷油量须经过转速变化修正和轨压波动修正后,才能获得主喷脉宽。

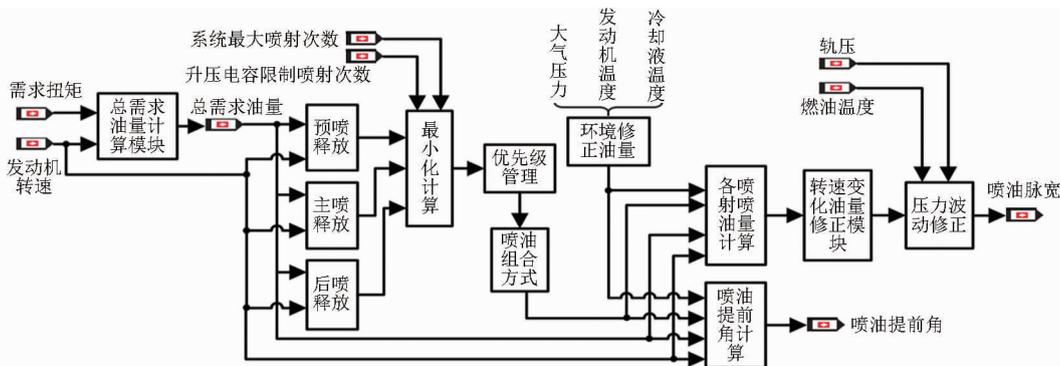


图 1 喷油控制系统总架构

Fig. 1 Total architecture of injection control system

2.1 总需求油量计算模块

如图 2 所示,由柴油机转速和扭矩在“扭矩-油量”MAP 中插值得到基础油量,该油量与性能限定油量和高压泵限定油量分别进行“取小”计算,结果作为双通道斜坡函数的 X_a 和 X_b 的输入,并由通道切换条件(condition,下文用 C 表示)对 X_a 或 X_b 通道进行选择计算。

双通道斜坡切换算法为:①当基础油量小于等于性能限定油量时,C 为 true, $x_k = x_b$ 。②当基础油量大于性能限定油量时,C 为 false, $x_k = x_a$ 。斜坡函数的目的是在柴油机工况变化时,将喷油量按照一定斜率逐渐逼近突变值,从而避免喷油量的突变引

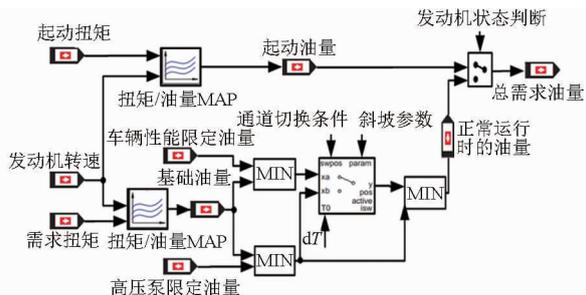


图 2 总需求油量计算模块

Fig. 2 Calculation module of total fuel demand

起转速明显波动。

根据输入值与目标值的差异采用不同的斜坡参数,有正/负斜率。斜坡函数的数学表达式为

$$y_k = \begin{cases} y_{k-1} + PT_0 & (y_{k-1} < x_k) \\ y_k & (y_{k-1} = x_k) \\ y_{k-1} - NT_0 & (y_{k-1} > x_k) \end{cases} \quad (1)$$

式中 y_{k-1} ——前一次的输入 y_k ——当前输入
 x_k ——目标值 T_0 ——采样周期
 P ——斜坡函数的正斜率
 N ——斜坡函数的负斜率

2.2 总需求油量的分配

总需求油量的分配是按照一定的喷油控制策略,对各预喷、主喷和后喷进行逐个分配。下面介绍几个主要的油量分配策略。

图3为预喷1油量分配策略。由于进气压力、进气温度和机体温度随柴油机工况不断变化,影响了发动机缸内的初始温度和进气量,对缸内混合气的形成和燃烧品质影响较大,则需要对喷油量进行环境修正的叠加,即:把柴油机转速和总需求油量经预喷1基础油量MAP插值得到基础油量与环境修正油量叠加。为了防止叠加修正后的预喷1油量值超过预喷1最大允许油量,须对二者进行“取小”计算。

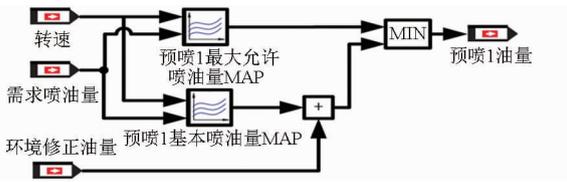


图3 预喷1油量计算模块

Fig.3 Calculation module of injection quantity for Pil 1

预喷2和预喷3油量的计算方法与预喷1喷油量的计算方法相似。

如图4所示,主喷目标油量的计算和预喷油量的计算有所不同:由总需求油量减去各次预喷油量及参与扭矩计算的部分后喷2油量,并与主喷最小油量进行“取大”计算得到最终的主喷目标油量。

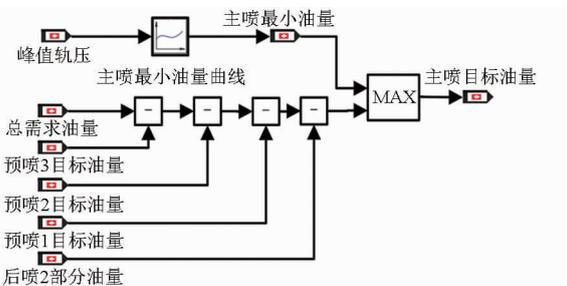


图4 主喷目标油量计算模块

Fig.4 Calculation module of target injection quantity for MI

2.3 转速变化主喷油量修正模块

柴油机进气系统具有迟滞性,缸内进气响应会滞后于喷油响应,尤其是在速度高瞬变率的情况下,使得进气量明显跟不上供油量的变化,引起空燃比减小,导致柴油机低速及瞬变工况燃烧恶化、性能下

降。通过设计一种基于转速变化率的主喷油量修正方法,在柴油机工况变化时,根据当前转速变化率对主喷油量进行定量修正,从而达到进气量和喷油量的匹配优化,弥补迟滞性带来的排放不达标现象。

可压缩性气体的欧拉运动微分方程为

$$\rho u \frac{du}{dx} = -\frac{dp}{dx} \quad (2)$$

式中 ρ ——空气密度 u ——进气流速
 p ——进气压力 x ——进气道长度

可压缩定常流动的质量、能量和动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(dA)}{\partial t} + \frac{\partial(duA)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial(duA)}{\partial t} + \frac{\partial(du^2A)}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + f_w \rho s &= 0 \\ \frac{\partial \left(dA \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right)}{\partial t} - qA + \\ \frac{\partial \left(duA \left(e + \frac{p}{d} + \frac{u^2}{2} \right) \right)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 f_w ——壁面剪切应力
 A ——管道截面面积 s ——管道周长
 q ——单位时间单位容积的传热量
 e ——内能 t ——运动时间
 p ——进气压力 d ——进气管直径

根据式(2)和式(3)进行推导后,得到实际进入气缸进气量的迟滞时间为

$$\tau = \frac{h\rho_d \pi R^2}{u} \quad (4)$$

式中 τ ——迟滞时间 ρ_d ——干空气密度
 R ——进气歧管半径
 h ——自然吸气进气口或涡轮增压器出口到进气门的进气道长度

如图5所示,主要采用影响系数法进行转速变化的油量修正,即:把传感器测量到的空气流量经过式(4)计算,得到进气迟滞时间 τ ,再与转速变化率 dn/dt 进行影响系数MAP插值计算,把该影响系数 θ 与主喷油量进行乘积计算,得到修正油量 Δq 。最后,为了防止影响系数标定错误导致发动机冒烟,须把影响系数法修正后的主喷油量再与冒烟限制油量进行“取小”计算,获得最终修正后的主喷油量。

如图6所示,在自然吸气柴油机转速变化工况中,影响系数 θ 是决定转速变化时油量修正幅度的重要参数,进气迟滞时间 τ 越大,进气延迟越高,此时空燃比变化较大,对喷油量的调节作用也越大,而且转速变化越快,进气迟滞也越明显。因此,影响系数 θ 随着进气迟滞时间 τ 和转速变化率的增大而增大。

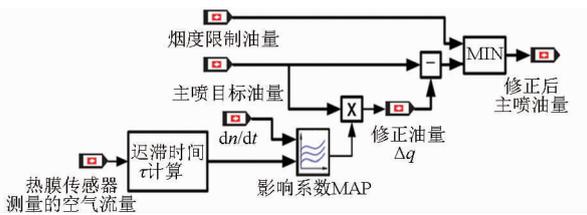


图 5 转速变化油量修正计算

Fig. 5 Calculation module of injection quantity correction based on speed change

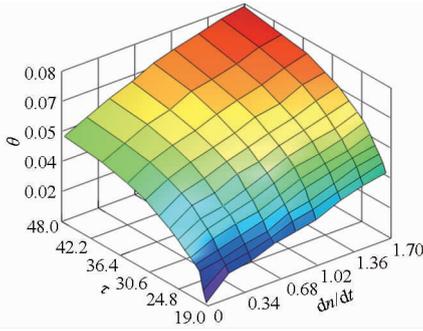


图 6 影响系数 MAP 图

Fig. 6 MAP of influence coefficient

2.4 多次喷射轨压波动油量修正模块

柴油是微可压缩黏性流体, 高压大脉宽的喷射会造成燃油流动不连续, 喷油器的盛油腔内会出现短暂的空腔。在短喷油间隔时, 前一次喷射引起的喷油器和高压油管内的燃油波动, 无法借助高压油泵的及时燃油补充来消除, 势必影响到后一次喷射, 只有在压缩上止点的多次喷射组合结束后, 才可通过轨压控制调整, 逐渐消除。有研究表明: 主喷油量随喷油间隔的缩小, 会在一定的角度区间呈现明显的波动现象。预喷脉宽和共轨轨压越大, 主喷油量所受的影响就越大^[20]。

多次喷射轨压波动油量修正是基于共轨喷射系统中多次喷射间隔造成轨压波动, 经过预估后一次将喷射时的喷油压力变化, 对喷油脉宽进行预调整, 以保障实际喷油执行精度的一种油量调节方法。根据流体动力学理论, 分析了喷油前后共轨管内的燃油压力变化。普通流体的伯努利方程和流体质量连续性方程为

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + d\Phi = 0 \quad (5)$$

$$m = vt_i A \rho \quad (6)$$

式中 p ——轨压 ρ ——燃油密度

v ——燃油流速

Φ ——单位质量的势函数

m ——前一次喷射油量

t_i ——前一次喷射脉宽

由式(5)、(6)推导出前一次喷射后的轨压波动修正 Δp

$$\Delta p = \frac{0.5 \times 10^9 m^2}{\pi^2 \rho t_i^2 r^4} \quad (7)$$

式中 Δp ——喷油后轨压修正压差

r ——共轨管半径

从式(7)可以看出, 喷油后的轨压变化量 Δp 与前一次喷射的油量呈正比, 与前一次喷射的脉宽呈反比。

图 7 为轨压波动修正计算模块: 把前一次的喷射油量和喷油脉宽进行轨压波动修正 Δp 的计算后, 并用喷射前的轨压减去 Δp , 得到前一次喷射完成后的修正轨压值, 最后再与主喷目标油量一起对主喷脉宽 MAP 进行插值, 得到主喷喷油脉宽。

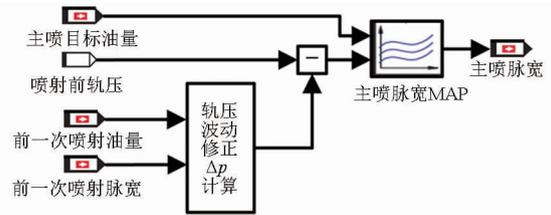


图 7 轨压波动修正计算

Fig. 7 Calculation module of pressure wave correction

3 试验结果

试验平台主要由自主开发的 ECU 软件系统和硬件系统组成。

ECU 软件系统: 使用 ASCET 建模工具构建喷油控制策略, 并结合底层驱动程序, 采用 RTA - OSEK 操作系统进行任务调度管理, 经过自动代码生成后, 由 Tasking 编译器编译生成“.hex”文件后, 下载到自制的 ECU 电路板。

ECU 硬件系统: 主芯片选用英飞凌的 TC1728 单片机芯片, 喷油驱动芯片选用英飞凌的 TLE6282 和相应的驱动 MOS 管, 并配合其他芯片, 自主设计和实现了 ECU 电路板。

柴油机采用云内动力的 YN33CR 型高压共轨四缸机, 其发动机参数如表 1 所示。

表 1 YN33CR 型高压共轨柴油机的技术参数

Tab.1 Technical parameters of YN33CR high pressure common-rail diesel engine

参数	数值
气缸数	4
排量/mL	3 298
压缩比	17
额定功率/kW	85
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 200
最大扭矩/(N·m)	315

3.1 起动及怠速工况试验

图 8 为柴油机起动到怠速的转速、总需求油量、

扭矩的变化曲线。起动时的“发动机状态”为1,喷油量计算直接由起动扭矩通过起动油量计算通道获得(图2),喷油量和扭矩较高,起动扭矩 $196\text{ N}\cdot\text{m}$,起动油量在 $35\text{ mg}/\text{cyc}$ 左右,经过 1.6 s 进入目标怠速 $800\text{ r}/\text{min}$,此时的发动机状态变为0,自动切换选择正常运行时的油量计算通道,切换过程中的斜坡函数起到了油量过渡的部分平滑作用,则喷油量和扭矩迅速下降,喷油量维持在 8.5 mg 左右,稳定转速在目标转速的 $\pm 10\text{ r}/\text{min}$ 范围内波动。

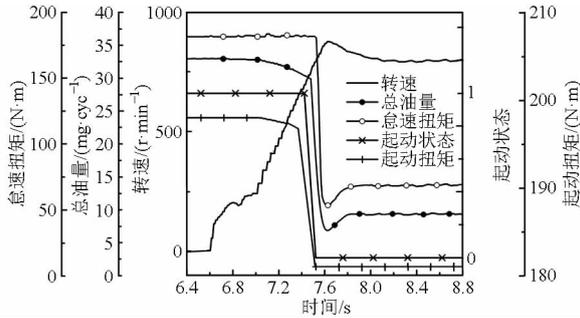


图8 扭矩-转速-油量变化特性曲线

Fig. 8 Characteristic curves of torque, speed and injection quantity changes

试验结果表明:起动过程顺利,起动油量和怠速后的油量计算通道能够自动切换,起动转速上升快速,能平稳过渡到怠速稳定运行,油量控制策略正确。

3.2 转速变化主喷油量修正试验

图9为转速波动油量修正曲线。试验时,测功机采用恒扭矩控制方式,设定扭矩为恒值 $48\text{ N}\cdot\text{m}$,转速分别在 5 s 和 7 s 时间范围内从 $1200\text{ r}/\text{min}$ 变化到 $1600\text{ r}/\text{min}$ 。

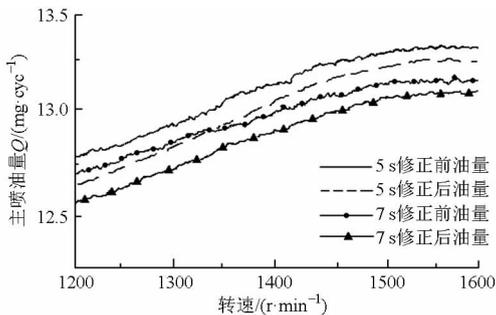


图9 不同转速变化率时主喷油量修正曲线

Fig. 9 Correction curves for MI injection quantity under different speed mutation rate

试验是在不同转速增变率条件下,调节喷油量的增变率,获得较为合适的空燃比。当转速增变率较高时,进气迟滞高,空燃比变大,则转速波动修正算法的目是抑制喷油量的增变率,使其能够匹配进气迟滞。同样,当转速增幅小时,进气迟滞相对较小,控制调整的强度就变弱。由试验曲线可以看出, 5 s 内的提速较快,故修正后的主喷油量比 7 s 修正

后的喷油量高。

试验结果表明:转速增变率越高,进气延迟越明显,缸内空燃比越小,此时MAP中的影响系数 θ 就越大,主喷修正油量 Δq 就越大。低速时进气迟滞明显,随着转速的升高逐渐减小,所以呈现出不同转速变化率之间的主喷油量差值随转速的上升而增大。

3.3 多次喷射轨压波动油量修正试验

图10为轨压波动修正后的喷油参数曲线,发动机转速由 $1200\text{ r}/\text{min}$ 加速到 $1400\text{ r}/\text{min}$ 。在加速阶段,为了获得更高的缸内起始压力和温度,缩短滞燃期,给定的预喷油量为最大值 $1.5\text{ mg}/\text{cyc}$,随着轨压的增加,预喷脉宽由 $335\text{ }\mu\text{s}$ 逐渐减小。轨压波动修正量 Δp 随着预喷脉宽的减小而逐渐增大,在 28.2 s 时其最大修正值 Δp_{max} 为 1.75 MPa 。

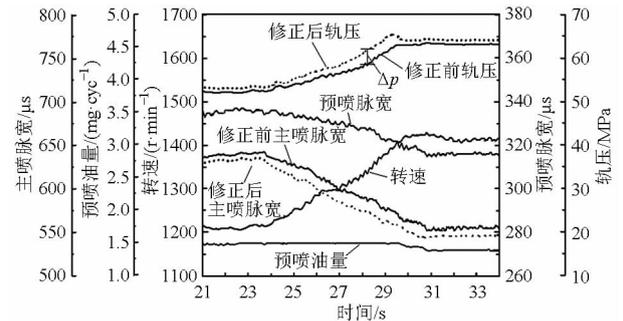


图10 轨压波动修正后各参数变化曲线

Fig. 10 Parameters variation curves after pressure wave correction

试验结果表明:采用预喷后的轨压修正按图7的控制算法获得的主喷脉宽与未经轨压修正时的数值相比,其修正后的主喷脉宽变小,且随着 Δp 的增加,二者的差距增大。通过对主喷压力和喷油脉宽的修正,能够有效抑制预喷引起轨压波动造成主喷油量的执行精度不高,从而改善了燃烧效果。

3.4 恒扭矩增转速工况试验

图11为恒扭矩变转速试验过程中柴油机转速、喷油量及喷油提前角的变化曲线。试验设定的负荷扭矩为 $126\text{ N}\cdot\text{m}$,转速从 $1600\text{ r}/\text{min}$ 逐渐上升至 $2400\text{ r}/\text{min}$,试验环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$,冷却水温 $85\text{ }^\circ\text{C}$,试验过程加入预喷1,指定预喷1油量为 $1.5\text{ mg}/\text{cyc}$ 。

试验结果表明:恒扭矩负荷工况时,转速变化率和轨压波动同时存在,采用前述喷油控制策略后,当转速上升时,预喷和主喷的喷油提前角逐渐增大,而喷油量的变化趋势不太明显。此外,在转速上升时,为了克服空气系统迟滞造成空燃比过小,不利于燃烧的现象,需要把当前喷油量的变化在原始喷油量的基础上适当减小,才能保持合适的空燃比。

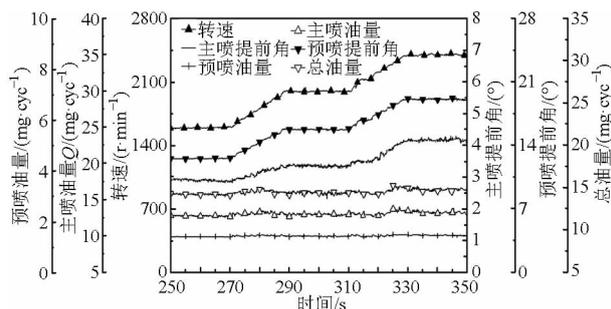


图 11 恒扭矩 126 N·m 时转速和油量随时间的变化曲线

Fig. 11 Change curves of rotation speed and injection quantity with time under torque of 126 N·m

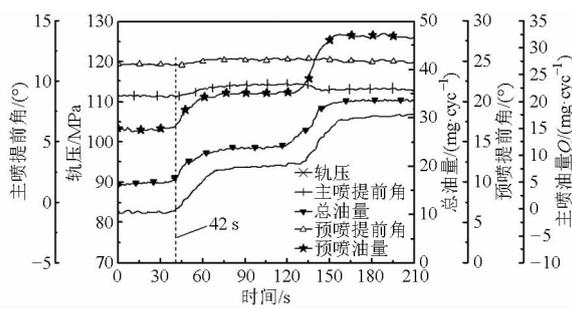


图 12 恒转速 2400 r/min 时轨压-喷油量等变化曲线

Fig. 12 Change curves of rail pressure and injection quantity under rotation speed of 2400 r/min

3.5 恒转速增扭矩工况试验

图 12 为恒转速增扭矩工况时的轨压-喷油量-喷油提前角的变化曲线,当负荷扭矩从 42 s 时的 60 N·m 逐渐增加,在 70 s 时达到 115 N·m,并保持 60 s 后,再逐渐增加到 170 N·m;指定固定预喷 1 油量为 1.1 mg/cyc,转速保持 2400 r/min 不变,轨压从 83 MPa 增加到 106 MPa,增加的油量是由轨压的增加而获得,且该喷油量也经过了轨压波动油量修正计算后得到的。

试验结果表明:恒转速增扭矩工况时,主喷油量的变化趋势与总需求油量、轨压的变化趋势一致,喷油控制策略正确、合理,其控制符合预期结果。

4 结论

(1) 高压共轨柴油机的转速变化会引起进气滞后,明显跟不上喷油速率,通过转速变化主喷油量修正算法获得进气量和喷油量的匹配优化,保持合适的空燃比,弥补了迟滞性现象。

(2) 多次喷射造成轨压波动,影响主喷油量的执行精度,通过轨压波动油量修正算法对主喷油量脉宽进行预修正,可提高喷油执行精度。

(3) 通过自主开发的软/硬件控制系统,在发动机台架上进行相关试验,验证了相关喷油控制算法的正确性。

参考文献

- 祝卿卿,王俊席,杨林,等. GD-1 柴油机多次喷射协调控制策略研究[J]. 内燃机工程,2006,27(4):26-30.
ZHU Keqing, WANG Junxi, YANG Lin, et al. Study of multiple-injection coordinate control strategy for GD-1 diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2006,27(4):26-30. (in Chinese)
- 肖文雍,冒晓建,王好战,等. GD-1 高压共轨式电控柴油机的起动控制策略研究[J]. 内燃机学报,2003,21(2):97-100.
XIAO Wenyong, MAO Xiaojian, WANG Haozhan, et al. Starting control of GD-1 high pressure common rail diesel engine[J]. Transactions of CSICE,2003,21(2):97-100. (in Chinese)
- 董伟,于秀敏,张斌,等. 预喷射对高压共轨柴油机起动特性的影响[J]. 内燃机学报,2008,26(4):313-318.
Dong Wei, Yu Xiumin, Zhang Bin, et al. Effects of pilot injection on start characteristics of a common-rail diesel engine[J]. Transactions of CSICE,2008,26(4):313-318. (in Chinese)
- 任卫军,史先信,焦生杰,等. 高压共轨柴油机喷油器零油量自学习标定策略[J]. 农业机械学报,2011,42(9):35-39.
REN Weijun, SHI Xianxin, JIAO Shengjie, et al. Zero fuel auto-learning calibration of injector in high pressure common rail diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(9):35-39. (in Chinese)
- SIDDAPPA S, BHUSNOOR, GAJENDRA BABU M K. Studies on performance and exhaust emissions of a CI engine operating on diesel and diesel-biodiesel blends at different injection pressures and injection timings[C]. SAE Paper 2007-01-0613,2007.
- HYUN K S, SEUNG H Y, CHANG S L. Effect of multiple injection strategies on the spray atomization and reduction of exhaust emissions in a compression ignition engine fueled with dimethyl ether (DME)[J]. Energy Fuels,2010,24(2):1323-1332.
- ZI Xinyun, JIANG Dahai, DENG Chenglin. Effects of injection strategy on DI diesel engine combustion[J]. Chinese Journal of Machinery Engineering,2007,20(3):71-74.
- 石秀勇,乔信起,倪计民,等. 多次喷射改善柴油机噪声及污染物排放的试验研究[J]. 内燃机工程,2010,31(5):25-29.
SHI Xiuyong, QIAO Xinqi, NI Jimin, et al. Experimental study on improving diesel engine combustion noise and emissions using multiple injection[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2010,31(5):25-29. (in Chinese)
- 舒歌梁,梁兴雨. 降低柴油机噪声的措施及评价[J]. 天津大学学报,2006,39(4):438-442.
SHU Gequn, LIANG Xingyu. Noise reduction measures and evaluation of diesel engine[J]. Journal of Tianjin University,2006,39(4):438-442. (in Chinese)
- HENEIN N A, LAI M C, SINGH I P, et al. Characteristics of a rail diesel injection system under pilot and post injection mode [C]. SAE Paper 2002-01-0218,2002.

- 11 李丕茂,张幽彤,谢立哲,等. 共轨系统多次喷射油量波动与轨压的关系[J]. 机械工程学报,2014,50(10):112-120.
LI Pimao, ZHANG Youtong, XIE Lizhe, et al. Relationship between multi-injection oil mass deviation of common rail system and rail pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10):112-120. (in Chinese)
- 12 YAN F, WANG J. Common rail injection system iterative learning control based parameter calibration for accurate fuel injection quantity control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(2):84-90.
- 13 杜巍,刘福水. 多缸柴油机转速波动与燃烧不均匀性的相关性[J]. 农业机械学报,2010,41(2):17-20.
DU Wei, LIU Fushui. Correlation between fluctuation of speed and combustion non-uniformity in a diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):17-20. (in Chinese)
- 14 CATANIA A E, FERRARI A, MITTICA A, et al. Common rail without accumulator: Development, theoretical-experimental analysis and performance enhancement at DI-HCCI level of a new generation FIS[C]. SAE Paper 2007-01-1258, 2007.
- 15 苏海峰,张幽彤,郝刚,等. 高压共轨多次喷射油量波动现象分析[J]. 北京理工大学学报,2011,31(7):795-798.
SU Haifeng, ZHANG Youtong, HAO Gang, et al. Analysis on multiple-injection fuel quantity fluctuation for high pressure common rail system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(7):795-798. (in Chinese)
- 16 田丙奇,马修真,范立云,等. 高压共轨喷油系统循环喷油量波动研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(5):609-614.
TIAN Bingqi, MA Xiuzhen, FAN Liyun, et al. Investigation on the cycle fuel injection quantity fluctuation of the high pressure common rail system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(5):609-614. (in Chinese)
- 17 崔慧峰,罗福强,董少锋,等. 柴油机渐缩形喷孔喷嘴流动特性研究[J]. 农业机械学报,2013,44(11):19-25.
CUI Huifeng, LUO Fuqiang, DONG Shaofeng, et al. Flow characteristics in diesel nozzle with convergent conical orifice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):19-25. (in Chinese)
- 18 徐洪军,常汉宝,邵利民,等. 重型直喷式柴油机多次喷射燃烧过程研究[J]. 内燃机工程,2009,30(5):54-58,62.
XU Hongjun, CHANG Hanbao, SHAO Limin, et al. Research on combustion process of a heavy duty DI diesel engine with split injection[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(5):54-58,62. (in Chinese)
- 19 丁晓亮,张幽彤,熊庆辉,等. 压电式高压共轨喷油系统喷油量波动特性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(7):11-14.
DING Xiaoliang, ZHANG Youtong, XIONG Qinghui, et al. Investigations into multiple-injection fuel quantity fluctuation for high pressure common rail system with piezo-actuated injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):11-14. (in Chinese)
- 20 祝轲卿,徐权奎,杨林,等. 高压共轨喷油系统多次喷射油量精确测量与规律分析[J]. 农业工程学报,2007,23(8):117-121.
ZHU Keqing, XU Quankui, YANG Lin, et al. Multiple-injection quantity measurement and analysis in high pressure common rail injection system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8):117-121. (in Chinese)
- 21 刘兴华,樊志强,高琢. 高压共轨燃油系统轨压波动特性的实验研究[J]. 汽车工程,2010,32(7):575-578.
LIU Xinghua, FAN Zhiqiang, GAO Zhuo. An experimental study on the rail pressure fluctuation characteristics of high-pressure common rail fuel system [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(7):575-578. (in Chinese)
- 22 徐劲松,申立中,王贵勇,等. 高压共轨柴油机轨压复合控制策略研究[J]. 内燃机工程,2012,33(2):54-59.
XU Jinsong, SHEN Lizhong, WANG Guiyong, et al. Study on compound control strategy of rail pressure for high pressure common rail diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2):54-59. (in Chinese)

(上接第 238 页)

- 14 江景良. 蝗虫复眼光谱敏感性的比较研究[J]. 生理学报,1983,35(1):5-9.
JIANG Jingliang. Spectralsensitivity of locust compound eyes: a comparative study[J]. Acta Physiologica Sinica, 1983, 35(1):5-9. (in Chinese)
- 15 吴卫国, HORRIDGE C A. 蝗虫复眼小网膜细胞角敏感度的变化规律[J]. 生物物理学报,1987,3(6):178-184.
WU Weiguo, HORRIDGE C A. Regular change of the angular sensitivity of the retinula cells in locust compound eye [J]. Acta Biophysica Sinica, 1987, 3(6):178-184. (in Chinese)
- 16 刘启航,周强. 光谱光照调控组合性光源激发蝗虫趋光效果试验[J]. 农业机械学报,2013,44(9):243-249.
LIU Qihang, ZHOU Qiang. Effect of locusts phototactic response to regulatory illuminance of LED light source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):243-249. (in Chinese)
- 17 MOTOHIRO W, FINLAY S, YUKIKO M, et al. Physiological basis of phototaxis to near-infrared light in *Nephotettix cincticeps* [J]. Journal of Comparative Physiology A, 2014, 200(6):527-536.
- 18 JANDER, Barry. The phototactic push-pull-coupling between dorsal ocelli and compound eyes in the phototropotaxis of locusts and crickets [J]. Zeitschrift Für Vergleichende Physiologie, 1968, 57(4):432-458.
- 19 HOMBERG U, AGNES P. Ultrastructure and orientation of ommatidia in the dorsal rim area of the locust compound eye [J]. Arthropod Structure & Development, 2002, 30(4):271-280.
- 20 魏国树,张青文,吴卫国,等. 棉铃虫蛾复眼光反应特性[J]. 昆虫学报,2002,45(3):323-328.
WEI Guoshu, ZHANG Qingwen, WU Weiguo, et al. Characteristic response of the compound eyes of *Helicoverpa armigera* to light [J]. Acta Entomologica Sinica, 2002, 45(3):323-328. (in Chinese)