

压电式共轨系统喷油量压力波动修正策略研究

丁晓亮, 张幽彤, 苏海峰

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为了解决压电式高压共轨喷油系统多次喷射过程中,水击效应引起的压力波动导致后续喷射油量波动的问题,设计了基于集总模型的周期函数喷油量压力波动修正策略。在此修正策略中,以一个由多个参数共同决定的周期函数来表征喷油量的波动特性,通过调节相关的喷射参数,最终实现对喷油量的补偿修正。实验结果表明,设计的集总模型计算结果与实验结果有很好的的一致性,所设计的修正策略能够在很大程度上减少喷油量波动的幅度,从而保证了多次喷射过程中每次喷油量的一致性。

关键词: 压力波动修正; 压电式共轨; 集总模型

中图分类号: TK 421. 6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2010)09-1037-05

Research into Pressure Wave Correction of Fuel Quantity Fluctuation for CRS with Piezo-Actuated Injector

DING Xiao-liang, ZHANG You-tong, SU Hai-feng

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the periodic fluctuation of fuel quantity of the succeeding injection during the multiple-injection for common rail injection system with piezo-actuated injector, which was caused by the pressure fluctuation due to the water-hammer effect generated by the closure of the needle valve during the preceding injection, a pressure wave correction control strategy on the basis of lumped parameter model is designed and implemented. The strategy adopts a sum of a plurality of periodic function to model the property of fuel quantity fluctuation. The correction is accomplished by adjusting the injection parameters of the succeeding injection. The results show that the calculation data based on established model has a good agreement with the experimental data and the fuel quantity fluctuation decreases considerably with a good consistency of the succeeding injection.

Key words: pressure wave correction; piezo-actuated CRS; lumped parameter model

为了满足日趋严格的排放法规要求,提高喷射压力和多次喷射已经成为高压共轨喷油系统机内净化的主要措施^[1],然而新的问题也随之产生。前一次喷射针阀关闭时,由于水击效应,会使得共轨系统液压油路内部产生燃油压力波动,进而会导致后续喷射的喷油量周期波动,而且喷油量波动的幅度会随着针阀落座速度的提高而增加,所以针对压电式喷油系统,油量波动的问题更为突出,国外的很多研

究均证实了这一点^[2-3]。

目前提出的修正方法都是按照一定的修正控制逻辑,通过 MAP 插值的方法来实现对油量的修正^[4]。在修正过程中,将修正油量作为预喷油量和主预间隔时间的函数,通过二者进行 MAP 插值获得喷油量修正值,进而对喷油脉宽进行修正,最终实现对喷油量的压力波动修正,然而上述的修正策略是依据 MAP 而执行的,而这些 MAP 是通过大量实

收稿日期: 2009-11-02

基金项目: 国家部委预研项目(40402030205)

作者简介: 丁晓亮(1983—),男,博士生, E-mail: dingxiaoliang@bit.edu.cn; 张幽彤(1965—),男,教授,博士生导师。

验获得的,且都是基于电磁式而非压电式共轨喷油系统。基于以上考虑,本文中针对压电式共轨喷油系统设计了一种基于集总模型的周期函数喷油量压力波动修正策略,旨在不改变 ECU 硬件的条件下,通过修正相关喷射参数实现对喷油量波动的修正,进而保证每次喷射的喷油一致性。

1 喷油量波动规律分析

为了更好地设计喷油量的压力波动修正策略,设计了相关实验,旨在分析喷油量的波动特性,在实验设计过程中,本文中对两次喷射(即一次预喷和一次主喷)的情况进行研究,分析在不同的预喷油量和主预间隔条件下,预喷所产生的压力波动对主喷油

量的影响,在实验中为方便调试,将主预间隔定义为预喷结束时刻与主喷开始时刻之间的间隔时间。

实验台架布局如图 1 所示,由油路系统、控制系统、测量系统和监控系统组成。在油路系统中,高压油泵由电机直接驱动,将燃油加压后经高压油管输送到共轨管中。在控制系统中,ECU 通过轨压传感器采集到共轨管中的燃油压力,然后调节调压阀使其稳定在目标压力上。通过标定界面可以实时修改循环喷射次数、喷射脉宽和主预间隔时间等喷射参数。测量系统主要用来精确测量每一次的喷射油量和喷射速率。在监控系统中,可以实时地监测喷射油量和喷射速率,并可保存数据以方便对数据进行后续处理。

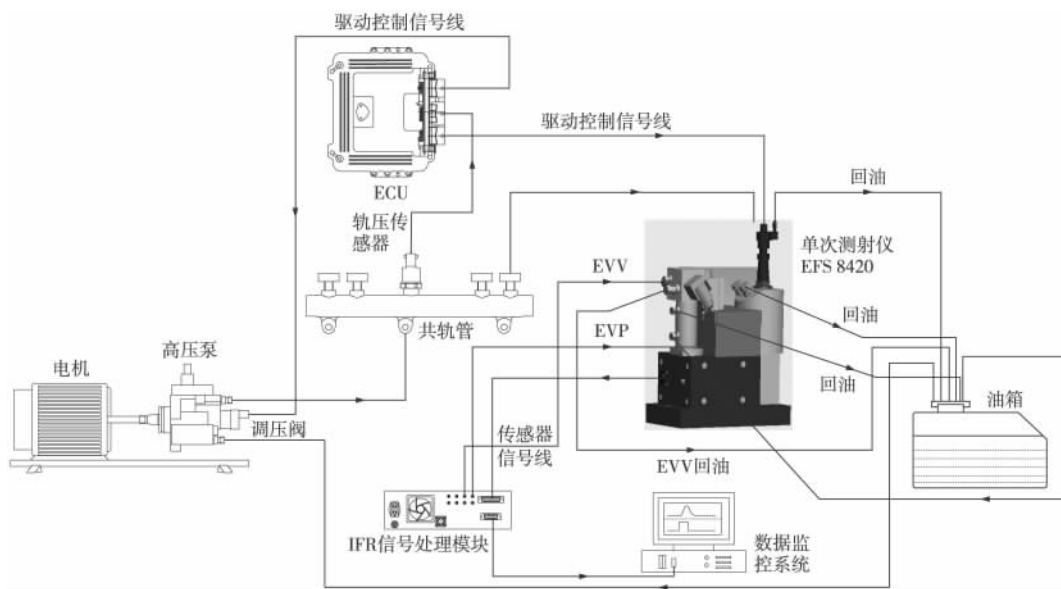


图 1 实验台架结构布局示意图
Fig. 1 Test-bench layout and instrumentation

实验中将目标轨压(p_{rail})设置为 60 MPa,同时保持预喷脉宽 400 μs 和主喷脉宽 800 μs 恒定不变,整理后的实验结果如图 2 所示,同样的实验也在轨压 100 MPa 下进行,实验趋势与 60 MPa 相同,故在此仅以 60 MPa 工况为例进行分析。从图 2 可以明

显地看出,在很大范围内改变主预间隔时间(t_D),预喷油量波动幅度很小。相反,主喷油量出现了很明显的波动,这种波动具有周期性、渐衰性的特点,即随着主预间隔时间的增加,喷油量波动的幅度逐渐衰减。本文各图中喷油量均指单次喷油量。

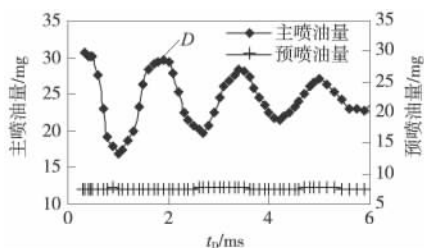


图 2 轨压 60 MPa 对应的预喷油量和主喷油量
Fig. 2 Injected quantity for pilot and main injections at $p_{rail} = 60 \text{ MPa}$

2 集总模型设计

喷油量的周期性、渐衰性的波动特性与单自由度阻尼振动系统特点十分相似,可以用式 $y = A \times \sin(\omega t - \varphi) + B$ 来表征,进而可以建立一个单自由度无阻尼的集总模型来表征喷油量的这种波动特性,如此便可很方便地求解出振动系统的固有周期,也就是喷油量的波动周期。考虑到设计此模型的主

要目的是求解喷油量的波动周期,为简化模型,在此可忽略液阻的影响. 共轨液压系统的数学模型由共轨管、高压油管和喷油器组成,由于液压系统数学模型与电气系统数学模型之间有很多的相似之处,且电气数学模型相关理论知识相当完善,因此可通过电液比拟以电气模型为基础对液压油路进行建模仿真^[5-6]. 具体模型如图3所示,各参数的物理含义如下: C_0 为共轨管的液容; C_1 为高压油管的液容; C_2 为喷油器内的供油道和压力室的液容; q_{m_0} 为从轨至高压油管的燃油质量流量; q_{m_1} 为从高压油管至喷油器的燃油质量流量; L_0 为高压油管的液感; L_1 为喷油器主油道的液感; p_0 为共轨管中的燃油压力; p_1 为高压油管中的燃油压力; p_2 为压力室中燃油压力. 按照电液比拟各物理量的对应关系,压力对应于电压,燃油质量流量对应于电流,液容对应于电容,液感对应于电感.

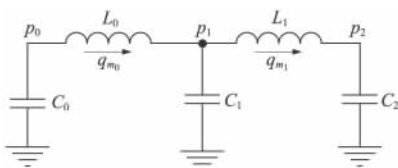


图3 共轨管-高压油管-喷油器集总模型

Fig. 3 Curves of injected rail-pipe-injector lumped parameter model

液容和液感的定义分别如式(1)和式(2)所示:

$$C = \Delta l / K_e, \quad (1)$$

$$L = \rho l / A. \quad (2)$$

式中: A 为管道横截面积; l 为管道长度; K_e 为燃油体积弹性模量; ρ 为燃油密度.

根据电路的基础知识,电容元件两端电压与电流的关系为

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -\frac{q_{m_0}}{C_0}, \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{q_{m_0} - q_{m_1}}{C_1}, \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{q_{m_1}}{C_2}. \end{cases} \quad (3)$$

电感元件两端电压与电流关系为

$$\begin{cases} L_0 \frac{dq_{m_0}}{dt} = p_0 - p_1, \\ L_1 \frac{dq_{m_1}}{dt} = p_1 - p_2. \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)两边取微分并将式(3)代入其中可得:

$$L_0 \frac{d^2 q_{m_0}}{dt^2} + \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \right) q_{m_0} - \frac{1}{C_1} q_{m_1} = 0, \quad (5)$$

$$L_1 \frac{d^2 q_{m_1}}{dt^2} - \frac{1}{C_1} q_{m_0} + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) q_{m_1} = 0. \quad (6)$$

式(5)(6)可以看作是一个二自由度无阻尼振动系统的运动微分方程,系统的固有振动周期即为油量波动的周期,因此问题转化为求解此振动系统的固有频率. 振型有非零解的充分必要条件是系数矩阵的行列式为0^[7],展开便可得到一个关于 ω^2 的二次代数方程,由此可解出 ω^2 为

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2 + \omega_1^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2 + \omega_1^2}{2} \right)^2 - \frac{1}{L_0 L_1} \left(\frac{C_0 + C_1 + C_2}{C_0 C_1 C_2} \right)}. \quad (7)$$

式中:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_0} \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \right); \omega_1^2 = \frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right).$$

周期与角频率的关系为

$$T = 2\pi / \omega. \quad (8)$$

依据实验所用共轨系统的结构参数,计算模型中的液容、液感等参数,结果为

$$C_0 = 2.7857 \times 10^{-14} \text{ m}^4 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$C_1 = 4.8362 \times 10^{-16} \text{ m}^4 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$C_2 = 1.9345 \times 10^{-16} \text{ m}^4 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$L_0 = 81455501.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4};$$

$$L_1 = 32582200.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4}.$$

将以上各参数代入式(7)(8)可得 $T = 1.484 \text{ ms}$ ($T = 0.414 \text{ ms}$ 不符合实际,故省去). 由于模型在设计过程进行了相应简化,所以根据模型计算出的周期 1.484 ms 与实验结果测得的周期 1.500 ms 相比,有很好的一致性. 确定了表征函数的周期之后,在修正过程中需要考虑的另外一个特性就是渐衰性. 确定不同工况下喷油量的波动幅度,即表征函数的幅值 A ,对其有直接影响的主要是预喷油量和主预间隔时间这两个喷射参数^[6],因此可将 A 作为预喷油量和主预间隔时间的函数,通过二者进行 MAP 插值获得.

根据 $y = A \sin(\omega t - \varphi) + B$,分析图2可知,可用其中的点 D (即喷油量波峰点)求取表征函数的初相 φ ,点 D 对应的主预间隔数值为 1900 ,代入表征函数并令

$$\sin(\omega t - \varphi) = 1, \quad (-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2).$$

便可以示出初相 φ . 表征参数 B 可以视作表征函数的基值,即控制策略中的目标喷油量,它是发动机状态参数的函数,通过一定的控制逻辑进行 MAP 插

值获得.

至此,便确定了表征函数中的所有表征参数,主喷油量集总模型计算结果与实验结果如图 4 所示.基于集总模型的压力波动修正控制逻辑如图 5 所示.

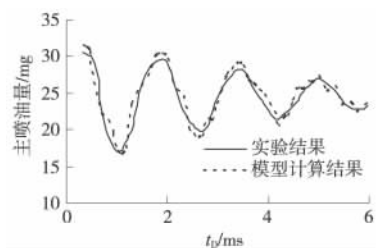


图 4 主喷油量计算结果与实验结果对比曲线

Fig. 4 Contrast curve of the main injection fuel quantity from computation and experiment

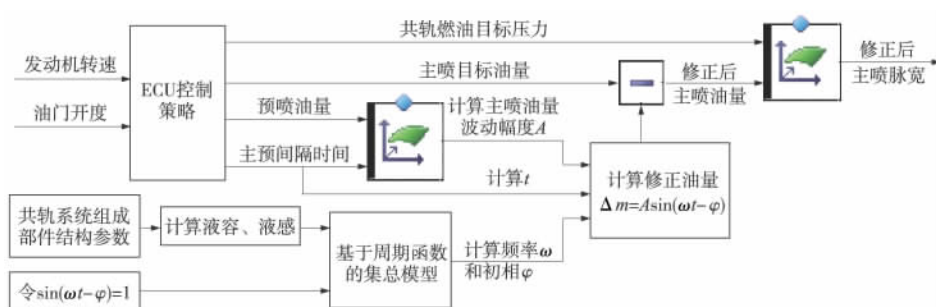


图 5 基于集总模型的压力波动修正控制逻辑

Fig. 5 Pressure wave correction control logic based on lumped parameter model

显减小.但与修正前不同,修正后的不均匀度曲线不再具有明显的周期性,这主要是因为,脉宽是由油量和轨压经 MAP 插值获得的,此 MAP 是在单次喷

为验证模型的优化效果,在此引入喷油量不均匀度 σ 这一评价指标,不均匀度越小,油量波动的幅度越小,喷油一致性越好,

$$\sigma = \frac{m_{\text{main}} - \bar{m}_{\text{main}}}{\bar{m}_{\text{main}}} \times 100\%. \quad (9)$$

式中: m_{main} 为针对给定主预间隔时间 t_D 的实际主喷油量; \bar{m}_{main} 为平均油量,

$$\bar{m}_{\text{main}} = \frac{1}{t_{D\text{max}} - t_{D\text{min}}} \int_{t_{D\text{min}}}^{t_{D\text{max}}} m_{\text{main}} dt. \quad (10)$$

式中 $t_{D\text{max}}$, $t_{D\text{min}}$ 分别为主预间隔时间的最大值和最小值,在此分别设定为 6.0 ms 和 0.2 ms,修正前后的实验结果分别如图 6(a), 6(b) 所示. 由图 6 可以很直观地看出,修正后的主喷油量的不均匀度得到了较大程度的优化,喷油量波动幅度比修正前明

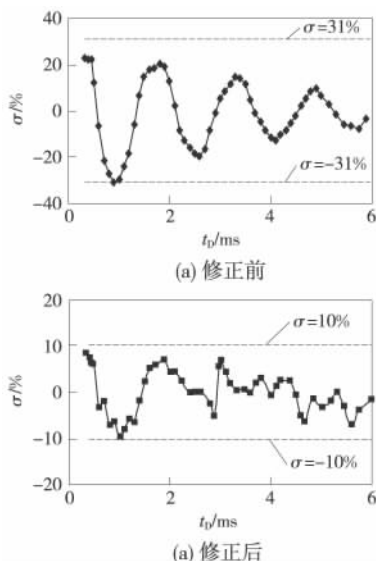


图 6 修正前后主喷油量不均匀度对比曲线

Fig. 6 Curves of the main injection fuel quantity before and after correction

射的条件下通过标定实验获得的. 当引入预喷后,主喷喷射过程中的喷油压力与单次喷射时不同,而修正后的脉宽仍然是由单次喷射标定实验所获得的 MAP 通过插值得到,因而使得修正后的油量不均匀度不再具有周期变化的特征.

3 结 论

压电式高压共轨喷油系统可以实现更短间隔、更多次数的喷射,为优化排放提供了更大的潜力.但是,如果多次喷射过程中每次喷射的喷油一致性无法得到保证,燃烧过程就会出现明显的循环变动,继而影响发动机的动力性、经济性和排放性能. 如何在不改变喷油系统的前提下,保证喷油一致性就成为一个关键问题. 本文中正是基于以上考虑,旨在通过设计一个基于集总模型的喷油量修正策略,并将其植入 ECU 控制软件构架中,在不改变 ECU 硬件的条件下,降低喷油量波动幅度,从而达到减小喷油量不均匀度的目的.

主要研究结论如下:

① 高压共轨系统多次喷射过程中,由于水击效应,前一次喷射结束时的针阀落座动作会引起液压油路中的压力波动,进而导致后续喷射的油量波动。

② 这种喷油量波动具有周期性、渐衰性的特点,预喷油量和主预间隔时间对其波动的幅度有很大的影响,共轨系统组件的结构参数决定喷油量的波动周期。

③ 设计的基于周期函数的集总模型的计算结果与实验结果具有很好的一致性,验证了模型的合理性,同时也表明集总模型能够较为精确地建立共轨组件的结构参数与喷油量波动周期之间的内在关系。

④ 设计的基于集总模型的压力波动修正策略,能够在很大程度上减小喷油量的波动幅度,提高喷油一致性,为多次喷射过程中喷油量的精确控制提供一个实用的修正方法。

参考文献:

- [1] Leonhard R, Warga J, Pauer T, et al. Bosch 2000—bar common rail system for passenger cars and light duty vehicles[C]// 29. Internationales Wiener Motorensymposium. Vienna, Austria;[s. n.], 2008:3-11.
- [2] Bianchi G M, Falfari S, Pelloni P, et al. A numerical

and experimental study towards possible improvements of common rail injectors, SAE paper 2002-01-0500[R]. [S. l.]; SAE, 2002.

- [3] Mulemane A, Han J S, Lu P H, et al. Modeling dynamic behavior of diesel fuel injection systems, SAE paper 2004-01-0536[R]. [S. l.]; SAE, 2004.
- [4] Takeuchi Yasuhiro. Fuel injection control apparatus for internal combustion engine: Japan EP0570986B2[P]. 1999-04-08.
- [5] 盛敬超. 液压流体力学[M]. 北京:机械工业出版社, 1980.
Sheng Jingchao. Hydraulic fluid mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1980. (in Chinese)
- [6] Catania A E, Ferrari A. Experimental investigation of dynamics effects on multiple-injection common rail system performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130:032806-1-032806-13.
- [7] 李晓雷. 机械振动基础[M]. 2版. 北京:北京理工大学出版社, 2005.
Li Xiaolei. The foundation of mechanics vibration [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. (in Chinese)

(责任编辑:匡梅)

(上接第 1019 页)

② 给出了靶板厚度、靶板材料和弹着速等参数对 PELE 斜侵彻终点效应影响的一般规律,总体来说,在 PELE 能够贯穿靶板前提下,弹靶作用越剧烈,轴向速度衰减越快,而 PELE 的横向效应越显著。

③ 分析了弹着角与靶板厚度、靶板材料及弹着速对 PELE 终点效应的综合影响情况。弹着角增大,PELE 侵彻能力和横向效应对靶厚度和材料敏感度升高,对弹速的敏感度降低。

④ 数值模拟结果与试验数据吻合较好,证明该数值方法可信度较高。

参考文献:

- [1] Paulus G, Chanteret P Y. PELE: a new penetrator concept for generating lateral effects[C]// Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia; IBC, 2004:104-110.

- [2] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perforating thin target plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33:566-579.
- [3] Kesberg G, Schirm V, Kerk S. PELE—the future ammunition concept[C]// Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia; IBC, 2004:1134-1144.
- [4] Roland F. Notes on tubular hypervelocity penetrators [C]// Proceeding of the 10th International Symposium on Ballistics. San Diego, USA;[s. n.], 1987:477-485.
- [5] Arias A, Rodriguez J A, Rusinek A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75:1635-1656.
- [6] Century Dynamics Inc. AUTODYN theory manual[M]. Rev. 4. 3. Houston, USA: Century Dynamics, 2003.

(责任编辑:刘雨)