

高压共轨喷油器喷射特性实验与仿真*

苏海峰^{1,2} 张幽彤¹ 王尚勇¹ 孙 帅¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 石家庄职业技术学院机电系, 石家庄 050081)

【摘要】 采用实验与数值模拟相结合的方法,进行了不同控制参数:共轨压力、喷油脉宽条件下高压共轨喷油器的喷射特性研究。通过实验数据总结了电磁式喷油器喷油量、喷油率、针阀开启延迟与关闭延迟、喷油持续期等喷射特性。利用 AMESim 软件建立的高压共轨燃油系统模型进行仿真计算,与实测喷油器喷油率结果进行了对比验证,分析了共轨系统喷射过程中喷油器内液力过程和针阀运动特性,得到了高压共轨喷油器喷射特性随共轨压力和喷油脉宽的变化机理和规律。

关键词: 喷油器 高压共轨 喷射特性 共轨压力 喷油脉宽

中图分类号: TK421+.42 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0022-05

Numerical-experimental Investigation of Injection Characteristics of High Pressure Common Rail Injector

Su Haifeng^{1,2} Zhang Youtong¹ Wang Shangyong¹ Sun Shuai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Department of Machinery and Electronics, Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract

By an integrated numerical-experimental approach, the injection characteristics of a production high pressure common rail solenoid injector were investigated on kinds of control parameters include rail pressure and energizing time. The characteristics of injection quality, injection rate, needle opening and closure delays, injection temporal length were summarized via experiment carried out on a test bench. A model of high pressure common rail injection system based on AMESim was used to calculate simulation results, compare and approve the experimental injection data. The injector hydraulic process and lift process of needle were simulated and analyzed. The mechanism and rules of injection characteristics depending on rail pressure and energizing time were summarized.

Key words Injector, High pressure common rail, Injection characteristics, Rail pressure, Energizing time

引言

燃油喷射系统是柴油机改进燃烧系统的关键部件。在所有的燃油喷射系统中,高压共轨系统在喷射正时和喷射压力方面具有最大的灵活性。喷油器喷油规律的精准控制是实现高压共轨喷射系统优势的基础,因此,除正确设计以优化共轨系统的结构参数外,还必须研究喷油控制参数与喷射特性之间的

规律,为喷油规律精确控制和控制算法的修改和实施奠定基础,使共轨系统在喷油规律精确控制的优势得到进一步发挥。已有研究集中在通过结构参数的优化提高喷油性能^[1~4],对控制参数影响的研究较少。本文研究轨压和喷油脉宽对喷油器控制阀运动特性、控制腔液力过程、稳压腔液力过程、针阀运动规律、喷油持续期、喷油率、喷油量的影响,并总结高压共轨喷油器喷射特性随轨压和喷油脉宽的变化

收稿日期: 2010-02-03 修回日期: 2010-03-05

* 国家自然科学基金资助项目(51076014)和河北省教育厅科研计划资助项目(Z2009465)

作者简介: 苏海峰,博士生,石家庄职业技术学院高级工程师,主要从事高压共轨系统开发研究,E-mail: suhf123@sina.com

机理和规律。

1 实验

在自行设计的高压共轨喷油系统实验台上进行喷射特性实验。实验台装备了 EFS IFR8420 型单次喷射仪测量喷油率和喷油量、Kistler4067 型瞬态压力传感器测量喷油器入口压力,以及精确测量和控制转速、油温、高压油泵供油压等参数的设备^[5]。实验条件控制为:油泵转速 600 r/min,油温 40℃,高压油泵供油压 0.2 MPa。为 4JB1 发动机匹配的 BOSCH 第二代共轨系统,采用 BOSCH 三柱塞径向高压泵,泵排量 550 mm³/r,共轨管容积 26 cm³,喷油器供油高压管长 60 cm,内径 2 mm。以 ISO-4113 标准的柴油机喷油设备校泵油替代柴油作为工作液体。自主开发的共轨系统 ECU 可以实现 5 次喷射,通过监控界面灵活选择各种工作参数。电磁式喷油器由电磁线圈、控制阀、控制柱塞、针阀、蓄压腔、喷嘴等组成,其结构如图 1 所示。

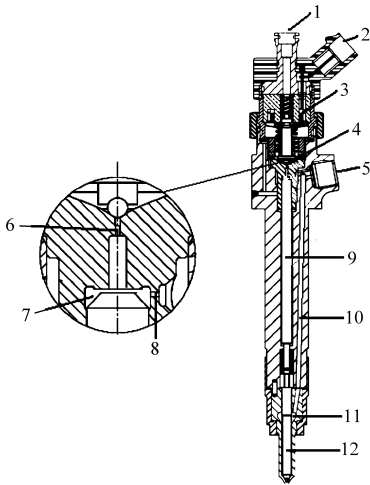


图 1 电磁式喷油器结构图

Fig. 1 HPCR solenoid injector

1. 回油口 2. 电插头 3. 电磁线圈 4. 控制球阀 5. 进口口
6. 出油孔(Z 孔) 7. 控制腔 8. 进油孔(A 孔) 9. 控制柱塞
10. 进油道 11. 蓄压腔 12. 针阀

2 实验结果分析

首先分析单次喷射的动态性能。实验工况包括:轨压 40 ~ 150 MPa,步长为 10 MPa;喷油脉宽 0.1 ~ 2.0 ms,步长为 0.1 ms。图 2 ~ 5 为实验台实测单次喷射典型工况,图中清晰显示了喷油量、喷油率、针阀开启与关闭、喷油持续期随轨压与喷油脉宽的变化关系。图中时间轴原点为喷油器线圈驱动电流上升时刻。

2.1 单次喷射喷油规律

喷油量随轨压、喷油脉宽变化特性曲线如图 2

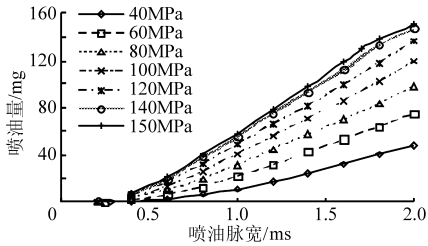


图 2 喷油量特性曲线

Fig. 2 Injection quality characteristics

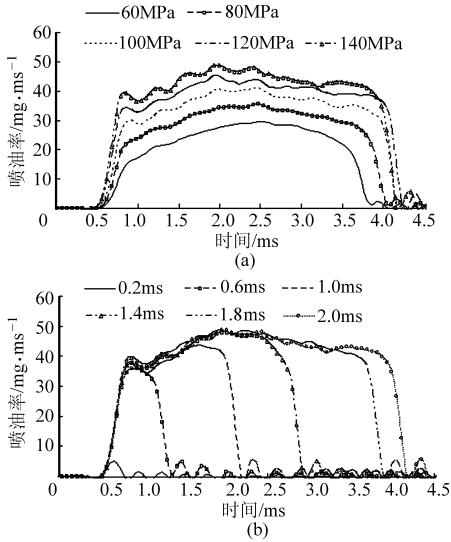


图 3 喷油率特性曲线

Fig. 3 Characteristics of injection rate

(a) 喷油脉宽 2 ms (b) 轨压 140 MPa

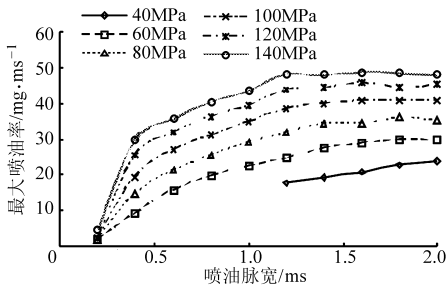


图 4 最大喷油率特性曲线

Fig. 4 Characteristics of maximum injection rate

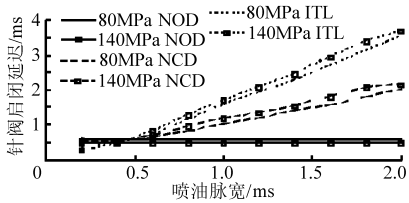


图 5 针阀开启关闭延迟与喷油持续期关系曲线

Fig. 5 Needle opening delay and closure delay with injection duration

所示。喷油量由 EFS 单次喷射仪测量 500 次,取平均值得到。在轨压一定时,喷油量与喷油脉宽呈线性增加关系,随轨压增加,线性斜率增大。140 MPa 在 1.8 ms 后、150 MPa 在 1.7 ms 后斜率降低,原因

是针阀升起到了机械行程上止点。喷油器零油量点随轨压增大而减小。

喷油率随轨压变化的特性曲线如图 3 所示。在喷油脉宽一定时,随轨压增加,喷油率最大值增大,喷射初期喷油率上升的斜率增大,喷射末期喷油率下降的速率增大(说明针阀启闭迅速),针阀开启延迟减小,关闭延迟增加,喷射持续期延长,喷油量增加。140 MPa,2 ms 工况因针阀到达上止点,针阀关闭延迟减小。

喷油率随喷油脉宽变化的特性曲线如图 3b 所示。在轨压一定时,随喷油脉宽增加,喷油率最大值增大而后保持不变,喷射初期喷油率上升斜率和末期下降的斜率不变,上升和保持阶段的瞬态喷油率曲线基本重合。

喷射结束后的喷油率波动现象是由于 EFS 喷油率测试仪的压电传感器座和喷油器喷嘴适配器处的压力波反射造成的。

最大喷油率随轨压、喷油脉宽变化的特性曲线如图 4 所示。最大喷油率随轨压增大而不断增加,轨压升高时,出现喷油率最大值的最小喷油脉宽减小,一定轨压下,出现喷油率最大值后,喷油率最大值曲线出现转折点,喷油脉宽继续增加时,喷油率最大值曲线斜率降为零。出现喷油率最大值的最小喷油脉宽(140 MPa 时为 1.2 ms,图 4)小于针阀能够到达机械上止点的最小喷油脉宽(140 MPa 时为 1.8 ms,图 5),可知,最大喷油率出现在针阀达到机械行程上止点前。

2.2 针阀开启、关闭特性

针阀开启延迟 t_{NOD} 、针阀关闭延迟 t_{NCD} 、喷油持续期 t_{ITL} 与喷油脉宽和轨压的依赖关系如图 5 所示。针阀开启延迟 t_{NOD} 是喷油率测试仪压力腔中压力升高时刻与共轨喷油器线圈驱动电流上升时刻的时间差。针阀开启延迟随轨压升高而轻微降低。轨压一定,针阀开启延迟基本不随喷油脉宽变化^[6]。

针阀关闭延迟 t_{NCD} 是驱动电流关闭时刻与喷射结束时刻的时间间隔。在每个压力下,针阀关闭延迟 t_{NCD} 在较宽的喷油脉宽 t_{ET} 范围内呈现线性增加的趋势。可表示为

$$t_{\text{NCD}} = t_{\text{ET}} + b$$

(1)

其中, b 为常数,由喷油器结构和轨压确定。 t_{ET} 值增大到一定值时(140 MPa,2 ms), t_{NCD} 不再增加,保持水平。压力升高, t_{NCD} 的最大值降低。喷油脉宽 2 ms 时,140、120、100 MPa 的 t_{NCD} 为分别为 2.14、2.23、2.16 ms,说明 140 MPa 时针阀已经达到升程上止点,如图 3a 所示。

喷油脉宽大于 0.45 ms 后,喷射过程相对于驱

动电流有所延迟且持续时间较长,喷油持续期 t_{ITL} 和针阀开启时间一致。喷油持续期 t_{ITL} 与喷油脉宽 t_{ET} 不相等,为

$$t_{\text{ITL}} = t_{\text{ET}} + t_{\text{NCD}} - t_{\text{NOD}}$$

(2)

轨压一定时,针阀在到达机械行程上止点前, t_{ITL} 随 t_{ET} 增加呈线性增长趋势,可以用线性方程表示为

$$t_{\text{ITL}} = 2t_{\text{ET}} - b_1$$

(3)

事实上,在此范围内, t_{NOD} 与 t_{ET} 无关, t_{NCD} 随 t_{ET} 线性增长。根据实验结果, b_1 可以表示为轨压的函数

$$b_1 = |q|p_{\text{rail}}^{-|r|}$$

(4)

式中参数 q 和 r 由喷嘴结构决定^[7]。

针阀在到达机械行程上止点后,图 5 中直线的斜率发生改变,呈现如下的线性关系

$$t_{\text{ITL}} = t_{\text{ET}} + b_2$$

(5)

此时, t_{NOD} 和 t_{NCD} 都为定值, b_2 是轨压的函数,有如下关系

$$b_2 = \sum_{i=0}^2 z_i p_{\text{rail}}^{-|r_i|}$$

(6)

其中系数 z_i 随喷嘴形状和最大针阀升程而变化。可以观察到, t_{ITL} 与轨压的函数关系几乎和 t_{NCD} 与轨压的关系相同, t_{NOD} 与轨压的关系比 t_{NCD} 与轨压的关系要小得多。

在实验研究的喷射系统中,在 t_{ET} 小于 0.43 ms 时, t_{ITL} 比 t_{ET} 短,图 5 所示,说明此时针阀升程小, t_{NCD} 比 t_{NOD} 短。

3 喷油器特性仿真

为了研究喷油器喷油规律和针阀运动特性的基本规律,使用 AMESim 软件进行仿真研究,以探明传感器难以检测的喷油器内部物理量的变化规律,计算得到难以测量的蓄压腔和控制腔的压力、控制阀和针阀的升程、Z 孔和 A 孔的质量流量的时间变化曲线,分析喷嘴开启和关闭的延迟与喷油器几何特性、物理参数和控制阀的动态响应的依赖关系。进行参数数字实验,以确定影响喷射特性的结构参数与控制参数。仿真过程考虑轨压及高压油管内的压力变化,以提高仿真结果的准确性。

喷油器中的运动部件:控制球阀、针阀等弹簧-质量-阻尼振荡系统的运动方程可以表示为

$$\sum F_f + F_s(l) + F_\delta \left(\frac{dl}{dt} \right) = m \frac{d^2 l}{dt^2}$$

(7)

式中 $\sum F_f$ ——液压合力 F_s ——弹簧力
 F_δ ——阻尼力 m ——运动件质量
 l ——运动件升程

控制腔压力变化决定了针阀的运动。控制球阀打开后,控制腔内的压力变化取决于进油孔、泄油孔的流量和控制柱塞上下运动造成的控制腔容积的变化。控制腔的连续性方程可以表示为等熵流动方程

$$\dot{m}_A + \frac{V_{cc}}{a^2} \frac{dp_{cc}}{dt} = \dot{m}_Z + \rho_{cc} S_{cp} \frac{dl_n}{dt} \tag{8}$$

式中 ρ_{cc} ——控制腔燃油密度
 V_{cc} ——控制腔容积 l_n ——针阀升程
 S_{cp} ——控制柱塞横截面积
 $\dot{m}_Z$ 、 $\dot{m}_A$ ——喷油器 Z 孔、A 孔的流量
 a ——液体的等熵声速
 p_{cc} ——控制腔压力

选取 4 种工况进行仿真-实验对比研究,包括: 80、140 MPa 两种轨压和 0.8、2.0 ms 两种喷油脉宽的 4 种工况组合。图 6 表明 4 种工况下喷油率实验结果与仿真结果有良好的一致性。图 7 表明仿真得到的控制阀开度,控制腔出油孔 A、进油孔 Z 的流量及控制腔内压力变化的液力过程;图 8 为针阀升程与运动速度仿真结果,解释了单次喷射的喷油规律和喷油器的动态特性。

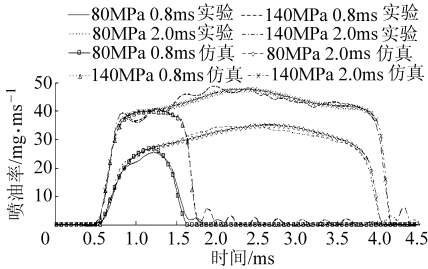


图 6 4 种工况喷油率实验与仿真结果

Fig. 6 Comparison of injection rate with experimental and simulation results

4 针阀运动特性

针阀开启和落座取决于控制腔压力、蓄压腔压力、摩擦阻力以及针阀弹簧的合力的方向和大小。在结构和轨压一定时,控制腔压力的变化决定了针阀的运动特性。

控制腔压力的变化由控制球阀的启闭决定,控制球阀的运动由喷油脉宽产生的电磁力控制,且受到控制腔压力和衔铁弹簧力的影响。

控制阀打开,泄油孔泄油,控制腔内的压力降低,但此时喷油器蓄压腔内的压力仍然保持高压,当作用在针阀锥面上的压力大于控制腔内的压力与喷嘴弹簧力之和时,针阀就被高压燃油抬起,喷油器开始喷油。当泄流孔关闭,高压燃油通过进油孔迅速进入控制腔,快速建立起控制腔内的压力,当控制腔内的压力与喷嘴弹簧力之和大于作用在针阀锥面上

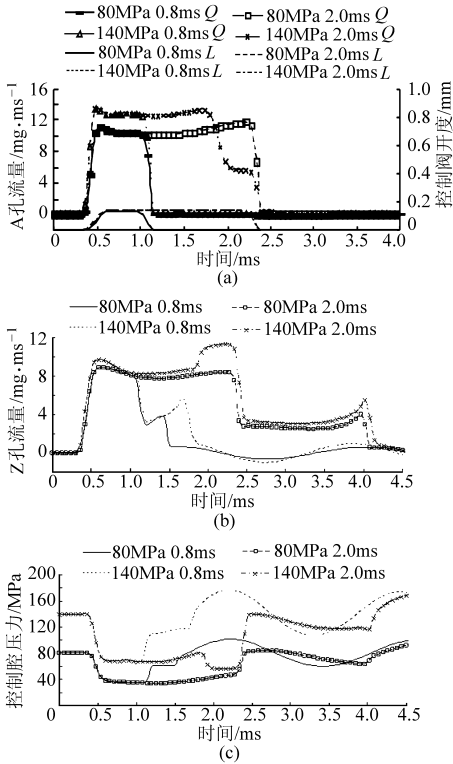


图 7 控制腔液力过程仿真结果

Fig. 7 Hydraulic process of control chamber and delivery chamber

(a) 控制腔出油 A 孔流量 Q 及控制阀开度 L
(b) 控制腔进油 Z 孔流量 Q (c) 控制腔压力 p_{cc}

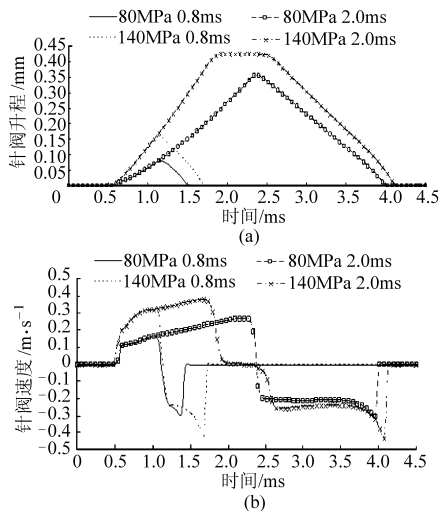


图 8 针阀运动特性曲线

Fig. 8 Characteristics of needle movement

(a) 针阀升程 (b) 针阀速度

的压力时,推动柱塞下移,直至针阀落到喷嘴座时,喷油完全结束。

由于喷油器的结构特点,轨压不同造成的控制腔压力变化特性,使得针阀启闭特性随轨压、喷油脉宽而变化。

在一定喷油脉宽下,轨压高,针阀开启时,控制阀打开快,出油 A 孔流量大,控制腔内压力下降始

点提前、压力下降快、降幅大(图7),针阀升起加速度快,针阀开启延迟 t_{NOD} 小(图8, 140 MPa: 0.495 ms; 80 MPa: 0.54 ms)。针阀升程的最初阶段,轨压增加造成稳压腔和控制腔压力差增加,针阀加速度增大,针阀升程随轨压升高而增加。针阀升起速度快,在控制阀关闭时针阀的升程大;针阀落座时,轨压增加造成稳压腔和控制腔压力差再一次增加,但控制腔内压力与轨压差值随轨压变化幅度小。针阀落座加速度随轨压升高而增大,但差别小于针阀升起加速度。由于轨压高造成的针阀落座始点的速度快、升程高,在落座加速度差别小时,使得针阀落座需要的时间长,造成针阀关闭延迟 t_{NCD} 随轨压升高而增大(脉宽 0.8 ms 时, 140 MPa: 0.96 ms; 80 MPa: 0.83 ms)。

而当针阀升程到达机械上止点后,轨压高的控制腔对控制柱塞产生较大的推动力,使针阀从行程上止点的下降加速度较大。由于针阀加速度随轨压升高而增大,针阀落座延迟时间 t_{NCD} 随轨压升高反而降低(图4)。

轨压一定时,随着喷油脉宽增加,针阀在开启过程能够达到的速度、升程增大,因此,线圈断电,控制阀关闭后针阀落座需要的时间加长, t_{NCD} 增大。当喷油脉宽增加到一定时间,针阀到达上止点后,脉宽继续增加,针阀升程不再增加,落座时间保持不变, t_{NCD} 也就不再增加。

虽然 t_{NCD} 随 t_{ET} 增加而增大,但针阀减速阶段所对应的时间间隔基本不变,约 0.15 ms。事实上, t_{ET} 增加,控制阀关闭时针阀速度和控制腔压力都增大,

针阀速度大控制腔的容积减小速度快,控制腔压力增加;控制腔压力增加,控制柱塞受到的反向力增大,对针阀速度产生了较大的阻尼作用。 t_{NCD} 随 t_{ET} 增加而增大,针阀减速阶段在 t_{NCD} 中所占比例减小。

5 结论

(1) 最大喷油率随轨压增加而不断增大;一定轨压下,出现最大喷油率的时刻随轨压增加而减小;在最大喷油率出现前,喷油率随脉宽增加而增大。

(2) 压力高,控制腔和蓄压腔的液体流量大,压力变化快,控制阀、针阀运动加速度大。压力高针阀升起、落座的速度快。

(3) 喷射过程相对于驱动电流有所延迟且持续时间较长,喷油持续期和针阀开启时间一致。喷油持续期由脉宽、针阀关闭延迟、针阀开启延迟组成。轨压高,喷嘴打开延迟短,针阀到达上止点前,关闭滞后,实际喷油持续期增加;针阀到达上止点后,针阀关闭延迟时间减小,喷油持续期减小。

(4) 针阀开启延迟时间 t_{NOD} 主要包括控制腔内的液体部分流出、压力降低,以使针阀移动的时间, t_{NOD} 随轨压增加而减小。

(5) 针阀关闭延迟时间 t_{NCD} 包括:控制腔压力升高、针阀改变运动方向的时间,针阀落座、喷孔最后完全关闭的时间。轨压一定, t_{ET} 增加针阀升程增加, t_{NCD} 随 t_{ET} 而线性增加,当 t_{ET} 增大到一定值时,针阀到达行程上止点, t_{NCD} 停止增加,保持在一定值。 t_{ET} 一定,轨压增加,针阀升程增加, t_{NCD} 随轨压线性增加,针阀到达行程上止点后, t_{NCD} 随轨压增加而减小。

参 考 文 献

- Hitoshi Tomishima, Takeo Matsumoto, Mamoru Oki, et al. The advanced diesel common rail system for achieving a good balance between ecology and economy [C]. SAE Paper 2008-28-0017, 2008.
- 何志霞,李德桃,胡林峰,等. 柴油机高压共轨喷油系统内的瞬变流动研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 48~51.
He Zhixia, Li Detao, Hu Linfeng, et al. Study on transient flow in a common rail injection system of diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 48~51. (in Chinese)
- 杨洪敏,苏万华,汪洋,等. 高压共轨式喷油器的无量纲几何参数对喷油规律和喷油特性一致性影响的研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(3): 244~249.
Yang Hongmin, Su Wanhua, Wang Yang, et al. An investigation of the effects of geometric parameters of CR injections on unevenness of response time and injection quantity of the injectors [J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(3): 244~249. (in Chinese)
- Catania A E, Ferrari A, Spessa E. Temperature variations in the simulation of high-pressure injection-system transient flows under cavitation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, 51(7~8): 2090~2107.
- 丁晓亮,张幽彤,熊庆辉. 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. 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)

按照优化后参数进行样品试制,经 EFS 单次喷射喷油规律实验测试得优化前后喷油器规律对比曲线,如图 6 所示。图中也包含控制信号,此时轨压为

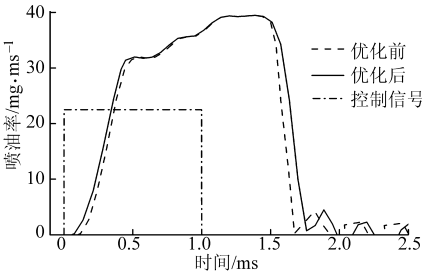


图 6 优化前、后喷油率曲线对比
Fig. 6 Flow rate difference between the before and after optimization

120 MPa,脉宽 1 ms,一次喷射。可以看出优化后开启延迟时间和关闭延迟时间有效减少,同时优化后喷油器开启时喷油率斜率有下降,从而使得发动机燃烧更加柔和,有利于减小噪声。

4 结论

- (1) 建立了高压共轨喷油器仿真模型,充分考虑了阻尼因素和燃油可压缩性的影响,经过实验验证,提高了模型精度。
- (2) 使用多目标模拟退火优化算法 MOSA 对高压共轨电控喷油器响应特性进行了优化设计,实验结果表明,开启响应延迟时间降低了 16.7%,关闭响应延迟时间降低了 15.2%。

参 考 文 献

1 Bianchi G M, Pelloni P, Filicori F, et al. Optimization of the solenoid valve behavior in common-rail injection system[C]. SAE Paper 2000-01-2042, 2000.

2 Bianchi G M, Falfari S, Parotto M. Advanced modeling of common rail injector dynamics and comparison with experiments [C]. SAE Paper 2003-01-0006, 2003.

3 Bianchi G M, Falfari S, Pelloni P. A numerical and experimental study towards possible improvements of common rail injectors[C]. SAE Paper 2002-01-0500,2002.

4 何志霞,李德桃,胡林峰,等. 柴油机高压共轨喷油系统内的瞬变流动研究[J]. 农业机械学报,2004,35(1):48~51.
He Zhixia, Li Detao, Hu Linfeng, et al. Study of transient flow in a common rail injection system of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004, 35(1):48~51. (in Chinese)

5 Teresa Donateo, Arturo de Risi,Domenico Laforgia. Optimization of high pressure common rail electro-injector using genetic algorithms[C]. SAE Paper 2001-01-1980,2001.

6 丁晓亮,张幽彤,熊庆辉. 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. 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)

7 Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi J. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983(220):671~680.

8 Ahmed M A, Alkhamis T M. Simulation-based optimization using simulated annealing with ranking and selection[J]. Computers and Operations Research, 2002,29(4):387~402.

9 Enrico R. MOSA-multi objective simulated annealing[R]. Esteco Technical Report,2003-003,2003.

10 Phil Stephenson, Yang Chen. Multi-objective optimization of a charge air cooler using mode FRONTIE-R [C]. SAE Paper 2008-01-0886,2008.

(上接第 26 页)

6 Marco Coppo, Claudio Dongiovanni, Claudio Negri. Numerical analysis and experimental investigation of a common rail-type diesel injector [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4):874~885.

7 Mirko Baratta, Andrea Emilio Catania, Alessandro Ferrari. Hydraulic circuit design rules to remove the dependence of the injected fuel amount on dwell time in multijet CR systems[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(12):121~104.