

电控单体泵燃油系统低速供油特性试验研究

胡 若,刘福水,王 沛,孙柏刚,张 峥,高永利
(北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081)

Experimental Study on Low Speed Fuel Delivery Characteristics of Electronic Unit Pump Fuel System

HU Ruo, LIU Fushui, WANG Pei, SUN Baigang, ZHANG Zheng, GAO Yongli

(School of Mechanical and Vehicular, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The experiment of low speed fuel delivery characteristics was carried out on an electronic unit pump tester. The changes of injection pressure and needle valve lift with different injection duration and cam speed was analysed, and the variation rule of cycle injection quantity at low speed was studied. The experimental results show that, when the electronic unit pump works at low speed, the injection pressure and needle valve lift have obvious fluctuation and decrease with the increase of cam speed. For different injection duration, the fluctuation rule of injection pressure and needle valve lift of the large injection duration is consistent with that of the small injection duration. At low speed, the cycle fluctuation of injection quantity of the small injection duration is less than that of the large injection duration, and decrease with the increase of cam speed.

摘要: 在电控单体泵试验台上进行了低速供油特性试验研究,分析了不同喷油持续期、凸轮轴转速条件下的喷油压力和针阀升程变化情况,并研究了低速时电控单体泵的喷油量循环变化规律。试验结果表明:电控单体泵低速工况时,电控单体泵喷油压力与针阀升程曲线存在明显波动,并随凸轮转速增加,波动变化减弱;在不同喷油持续期内,大持续期喷油压力与针阀升程曲线波动规律与小喷油持续期一致;低转速下小喷油持续期喷油量循环波动小于大持续期工况,且随凸轮转速增加,喷油量循环波动降低。

关键词: 内燃机;电控单体泵;低速;供油特性;喷油压力;针阀升程

Key words: IC engine; electronic unit pump; low speed; fuel delivery characteristics; fuel pressure; needle lift

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.01.012

中图分类号: TK421⁺.42

文献标识码: A

0 概述

应用于大功率柴油机的电控单体泵燃油系统在较大循环喷油量前提下能够实现高压喷射,国内很多科研人员对电控单体泵喷油系统进行了相关研

究,以更加充分地利用燃油,在柴油机更好工作的同时降低排放^[1]。目前大部分研究是在柴油机中高速工况下进行,而针对柴油机低速工况下电控单体泵供油特性方面的研究相对较少。然而低速工况下,单体泵的供油特性直接影响到发动机的起动过程,

收稿日期:2015-01-08

基金项目:国家国际科技合作项目(2013DFR70170)

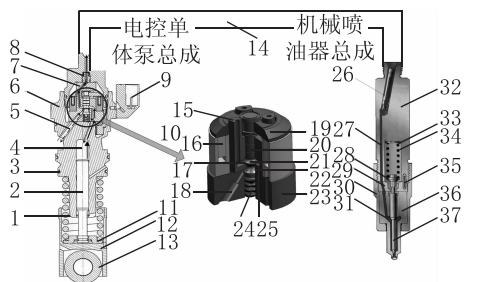
作者简介:胡 若(1988—)男,博士生,主要研究方向为柴油发动机供油系统,E-mail:huruohai@sina.com;

刘福水(联系人),教授,博士生导师,主要研究方向为柴油发动机及燃烧,E-mail:fushui_liu@bit.edu.cn。

同时对发动机排放有至关重要的影响^[2]。研究单体泵燃油系统低速供油特性对改善发动机工作性能具有重要意义。本文通过充分了解低速工况下燃油系统的供油特性,并基于此来提高发动机的起动性能,提高燃油利用率。本文采用控制变量法进行试验研究,试验过程每次只改变一个参数,然后对比试验结果,最后分析得出结论。通过对单体泵的低速供油特性的研究,了解其低速供油特性,为改进发动机起动时电控单体泵的性能提供了理论基础。

1 电控单体泵燃油系统工作原理

电控单体泵燃油系统是一种时间控制的脉动式高压燃油喷射系统。通过电子控制单元(ECU)控制电磁旁通阀的启闭来控制高低压油路的通断,进而决定电控单体泵泵出的燃油是流向低压油路还是喷油器。电磁阀断电,凸轮进入下降段后,柱塞受到柱塞弹簧力作用向下运动,电控单体泵柱塞腔内压力低于低压油路油压,此时低压燃油经控制阀密封锥面进入柱塞腔,完成充油过程。柱塞上行,柱塞腔内燃油被压缩,油压上升。若电磁阀断电,柱塞腔中的高压燃油回流到低压油路。若 ECU 此时向电磁阀提供合适的驱动电流,控制阀切断高低压油路,柱塞腔中的高压燃油会经高压油管进入喷油嘴盛油槽。当盛油槽内压力超过针阀开启压力,针阀开启,开始喷油。驱动电流归零,高低压油路接通,柱塞腔中油压下降,喷油嘴盛油槽中油压下降。当盛油槽中油压低于针阀开启压力,针阀落座,结束喷油。图 1 为电控单体泵燃油系统^[3-6]。

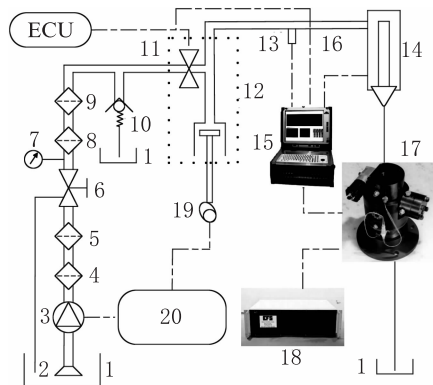


1. 柱塞弹簧 2. 柱塞 3. O 形圈 4. 柱塞腔
5. 低压油道 6. 泵体 7. 调整垫块 8. 出油阀
9. 电气接口 10. 电磁阀 11. 柱塞弹簧底座
12. 挺柱总成 13. 滚轮 14. 高压油管 15. 油道(到高压油管)
16. 电磁线圈 17. 控制阀密封锥面
18. 油道(到低压油路) 19. 衔铁 20. 控制阀杆
21. 高压油腔 22. 低压油腔 23. 控制阀体
24. 阀杆回位弹簧 25. 油道-到柱塞腔 26. 滤针
27. 进油道 28. 承压销 29. 中间盘 30. 喷油嘴紧帽
31. 盛油槽 32. 喷油器体 33. 垫片
34. 调压弹簧 35. 定位销 36. 喷油嘴 37. 针阀

图 1 电控单体泵燃油喷射系统

2 试验设备及台架

试验在单体泵驱动控制平台上进行,试验系统如图 2 所示。



1. 油箱 2. 滤网 3. 输油泵 4. 一级粗滤
5. 二级粗滤 6. 调压阀 7. 油压表 8. 一级细滤
9. 二级细滤 10. 单向阀 11. 电磁阀
12. 电控单体泵 13. 油压传感器 14. 机械喷油器
15. Dewetron-5000 燃烧分析仪 16. 高压油管
17. EFS 单次喷射仪 18. EFS 控制单元
19. 凸轮轴 20. 油泵台控制系统

图 2 油泵台试验系统示意图

使用 Dewetron-5000 燃烧分析仪采集高压油泵端燃油压力、驱动电流和喷油器针阀升程信号。电控单体泵选用 Delphi-E1, 柱塞直径 11 mm, 行程 18 mm, 通过 ECU 控制其上电磁阀闭合建立高压。喷油器采用 Bosch 机械喷油器, 启喷压力 0.28 MPa。利用 Kistler 4067BB2000 型油压传感器、电荷放大器采集高压油管中的燃油压力。使用 EFS 8246 型单次喷射仪采集喷油器循环喷油量。该测试仪器测量精度达到 0.6 mm³, 其测量范围是 0~600 mm³, 实现每分钟 30~3 000 周期的喷油量测量。图 3 为 EFS-8246 测量模块实物图。单体泵供油系统的低压油路供油压力 0.6 MPa。通过对不同驱动电流参数的影响研究, 确定驱动电流为 11 A 和 4 A^[7-10]。



图 3 EFS-8246 测量模块

为了实现燃油系统等压喷射, 供油系统中使用了工作段为降速段的降速凸轮驱动挺柱总成。试验中, 凸轮轴最高转速不超过 1 300 r/min。单体泵匹

配的凸轮型线如图 4 所示。

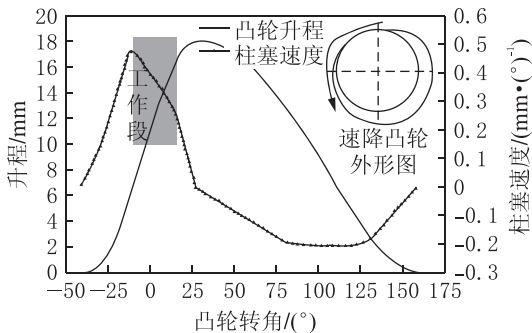


图 4 目前使用的凸轮型线

单体泵中电磁阀的驱动电流如图 5 所示。电磁阀的运动分为开启、保持开启和关闭三步。驱动电流从产生开始到迅速升到峰值是为了快速起动车电磁阀开启,然后降低到 4 A 左右来保持电磁阀的开启状态,最后电流迅速降低使电磁阀迅速关闭。

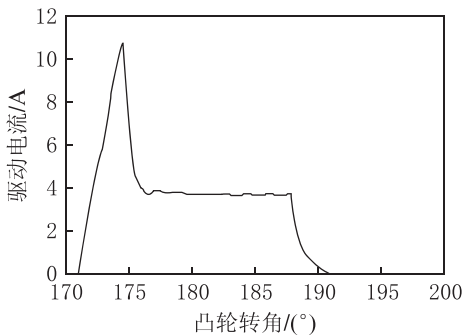


图 5 单体泵中电磁阀的驱动电流

电控单体泵燃油系统油压曲线由该系统内部油道中各压力波叠加而形成,主要反映喷油嘴针阀运动、电控单体泵(EUP)控制阀运动、柱塞运动的特征。影响压力波的因素主要包括供油系统内运动件(喷油嘴针阀、电控单体泵控制阀、柱塞)位置变化而引起的流道截面变化和油管变形等。由于密封的盛油槽内油压难以测量,本文将油压测点设在泵端。

图 6 为针阀升程传感器位置图。在喷油器上打孔,引出针阀传感器线,将针阀传感器安装在控制柱塞圆锥面,用来采集针阀升程信号。本文试验中使用的喷油器为 Bosch 机械式喷油器,图 6 中的控制柱塞作用是调节针阀升程的高度。

3 试验结果及分析

3.1 EUP 系统不同转速供油特性变化规律试验研究

图 7 为凸轮转速 100 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 7°,喷油控制信号提前角(以凸轮转角

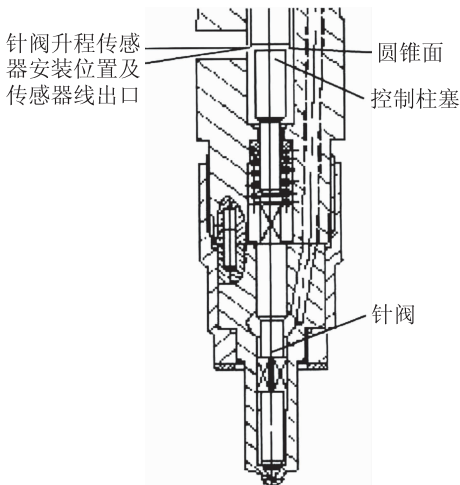


图 6 针阀传感器安装位置示意图

计)为 9°时的泵端油压试验结果。此试验条件下,最高油压为 33 MPa,针阀开启的泵端压力约为 28 MPa,针阀开启以后,油压和针阀升程信号均剧烈波动,但在喷油持续期内,油压始终保持在 20 MPa 以上。试验结果表明:此工况下,针阀时开时关,无法保持开启状态。对比油压、针阀升程曲线,每个油压峰值都对应一个针阀升程信号,如图 7 中油压峰值 A 对应针阀升程信号顶点 a。

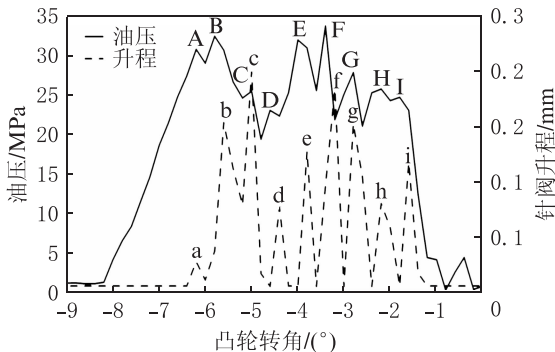


图 7 100 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 7°,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9°的油压、针阀信号

油压建立后,低压油管中控制阀关闭,活塞继续上行,使盛油槽内压力升高,盛油槽内压力升高至大于或等于针阀开启压力后,因油压较小,针阀逐渐开启,开始喷油。此时盛油槽内油压下降较小,针阀升程随之减小;活塞继续上行,压力波叠加使得针阀升程迅速增加;喷油量增大,盛油槽内油压迅速降低,针阀升程迅速降低但针阀依然没有关闭;柱塞继续上行,压力波继续叠加,此时针阀完全开启,喷油量达到最大,盛油槽内油压迅速降低至低于针阀开启压力,针阀落座,盛油槽内油压随针阀落座迅速增大。如此反复形成锯齿状曲线。

随着凸轮转角改变,油压迅速降低,油压降低到

小于针阀开启压力时,针阀落座,喷油完成。从图7看出,针阀落座以后,油压有反弹。出现这种情况的原因是:针阀关闭以后,形成封闭空间,燃油压缩并产生压缩波,压缩波碰撞针阀并反射,与高压燃油压力波产生叠加,而针阀落座后,能量无法通过喷油带走,因而出现压力波反弹。然而叠加产生的压力远低于针阀开启所需要的压力,因而压力波及压缩波产生的能量不断衰减直至油压降低到初始油压。

另外,各针阀顶点相位滞后相应油压峰值约 0.2° 凸轮转角。产生这种情况的原因是:高压油管长500 mm,柴油中的压力波传播速度约为1300 m/s,经计算,压力波由泵端传播到盛油槽约经过 0.23° 凸轮转角。

图8为喷油持续期(以凸轮转角计)为 7° ,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9° 时,不同凸轮转速下的泵端油压试验结果。随着转速升高,油压上升段不断滞后。EUP油压建立过程是从控制阀关闭开始的,控制阀关闭后,切断高低压油路,柱塞压缩密闭空间中的燃油,进而建立油压。各转速在相同的驱动电流下,电控单体泵控制阀响应特性基本一致,因而不同转速下控制阀关闭过程所用的时间是相等的。综上,在同样的时间内,随凸轮转速的升高,控制阀关闭所经历的凸轮转角变大,此现象在图中所表现出来即为:相同的喷油持续期及喷油提前角条件下,随转速升高,油压上升始点不断滞后。

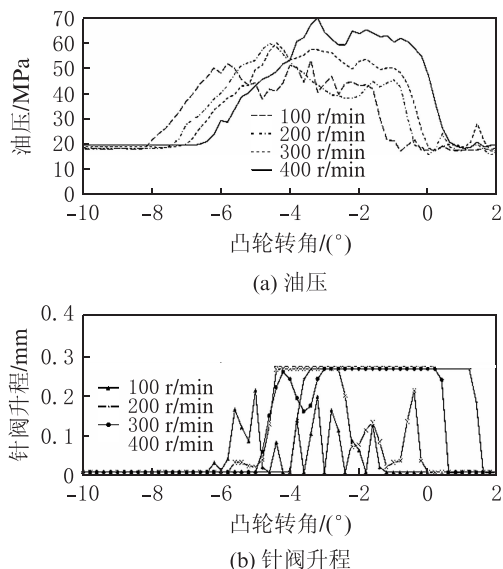


图8 喷油持续期(以凸轮转角计)为 7° ,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9° 时不同转速下油压和针阀信号

此外,图8还展示了转速与针阀升程之间的关系:随转速升高,针阀开启始点不断滞后。产生这种现象是因为油压上升段不断滞后导致针阀开启压力

滞后。100 r/min时,喷油持续期内针阀剧烈波动,重复启闭;200 r/min时,喷油持续期中部,针阀可以保持开启,但前后均出现启闭;300 r/min时,喷油持续期前部,针阀开启后出现关闭趋势,之后重新打开直至喷油结束;400 r/min时,喷油持续期内针阀始终保持开启。200 r/min、300 r/min针阀刚开启便立刻开始关闭,这是由于在这两个转速下针阀开启导致油压明显下降所致。图8表明:随着转速升高,喷油压力不稳定性逐渐降低,针阀逐渐可以稳定保持开启状态,且400 r/min时,针阀无明显波动。

产生图8所示现象的原因是:随着转速的增加,喷油导致盛油槽油压降低速度与盛油槽内油压的建立速度差越来越小,当建压速度大于喷油导致的降压速度时,盛油槽内的压力便保持在针阀开启压力之上,因而针阀能够保持稳定开启。

3.2 EUP系统低转速下不同持续期供油特性变化规律试验研究

为了更好地了解到低速工况下喷油压力波动特性规律,本文中进行了大脉宽工况与日常低转速小脉宽工况喷油波动特性规律的对比研究分析。

图9为凸轮转速100 r/min,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9° 时,不同喷油持续期下的泵端油压试验结果。不同持续期时油压建立后均剧烈波动,大持续期时的油压曲线包络小持续期时的油压曲线。这说明该工况下任意持续期内的油压不稳定,但大持续期的油压波动会“稳定”地遵循小持续期时的油压波动规律。针阀信号同样也呈如此规律。同样,不同持续期时,每个油压峰值都对应一个针阀信号顶点,即大持续期时的针阀信号顶点与小持续期时对应的针阀信号顶点基本一致。油压及针阀升程信号剧烈抖动的原因已在上文解释。图9中大持续期油压及升程信号波动遵循小持续期油压及针阀信号波动的原因是:在同一转速下,油压的建立以油压达到针阀开启压力的过程是不变的,在转速一定的情况下,改变喷油持续期对油压的建立过程几乎没有影响。

图9中喷油持续期(以凸轮转角计)为 3° 和 4° 时,控制脉宽结束后,尽管油压反跳,但此时针阀信号并无变化。这说明油压下降到一定程度后针阀便无法打开,原因是此时盛油槽内油压已远低于针阀开启压力,即使有参与压力波的叠加,也无法达到针阀开启压力。

图10为凸轮转速100 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 8° ,喷油控制信号提前角以凸轮转角计为 9° 时,连续7个循环的泵端油压试验结果。虽然对于单个循环而言,油压、针阀信号波动明显,显示出低速时的不稳定性,但各循环之间变动较小,7个循环间

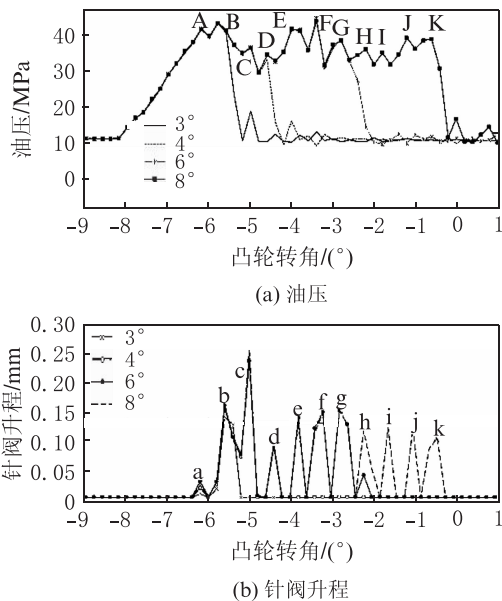


图9 100 r/min下喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9° ,不同喷油持续期时的油压和针阀信号

的油压和针阀信号整体形状及相位一致,这又表现出电控单体泵燃油系统低速时具有一定的稳定性。

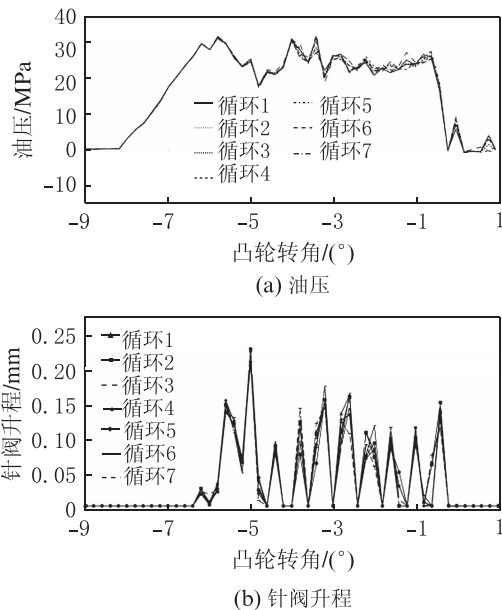


图10 100 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 8° ,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 9° 时的油压和针阀信号循环变动

3.3 EUP系统喷油量循环变动规律试验研究

采用均方差评价各循环喷油量的离散程度。均方差也称标准差,是各数据偏离平均数的距离的平均数。其计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中, x_i 为每循环喷油量; μ 为平均喷油量,是 x_1 ,

$x_2, \dots, x_N$ 的算数平均值; N 为循环次数。

如图11所示工况1凸轮转速100 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 7° ,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 20° ,均方差2.98;工况2凸轮转速300 r/min,喷油持续期(以凸轮转角计)为 5° ,喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 20° ,均方差0.43。试验中每个工况采集了100个循环的喷油量。由图11可明显看出:均方差大的工况循环喷油量离散程度高,喷油量循环变动大;均方差小的工况循环喷油量离散程度低,喷油量循环变动小。均方差可以反映出循环喷油量的不均匀性。

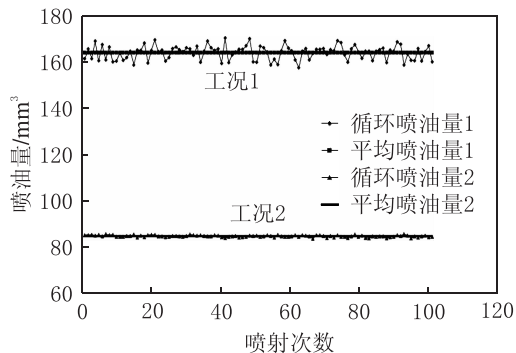


图11 均方差2.98(工况1)与均方差0.43(工况2)各循环喷油量、平均喷油量

图12为喷油控制信号提前角(以凸轮转角计)为 20° ,中低速时不同喷油持续期下喷油量均方差。除100 r/min下喷油持续期(以凸轮转角计)为 7° 和 9° 两个工况外,其余工况均方差都小于2。100 r/min,低负荷均方差较小;中高负荷,100 r/min均方差都高于其余转速下的喷油量均方差。这说明100 r/min中高负荷时的喷油量不稳定性要高于其余转速。

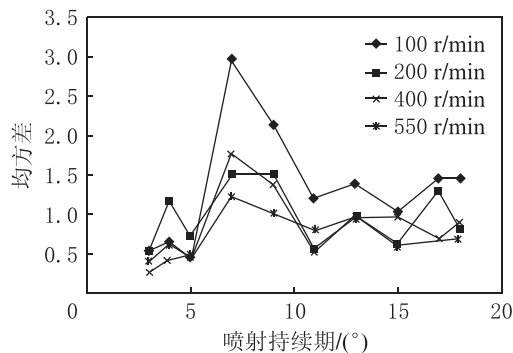


图12 不同转速下,不同喷油持续期喷油量均方差

图13为根据图12求平均值所获得的结果。相同喷油持续期时,低转速工况下,随着转速的升高,喷油量的均方差逐渐减小并最终停留在0.7左右。相同转速工况下,喷油持续期增大,喷油量的均方差会增大,喷油量不稳定性增强。该现象说明,在低转速

范围内,随着发动机转速的升高,喷油量离散程度逐渐减小,喷油量稳定性随着转速增大而逐渐增强。

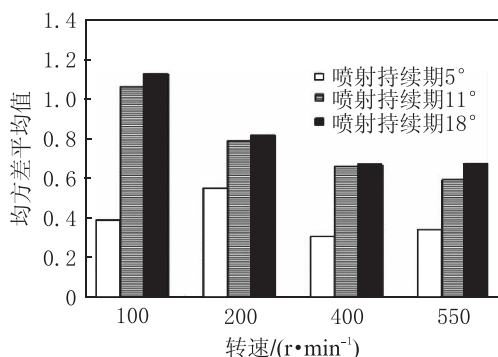


图 13 不同转速不同喷油持续期下喷油量均方差平均值

4 结论

(1) 电控单体泵低速工况时,油压建立后存在明显波动,喷油持续期内针阀无法稳定保持开启状态,喷油持续期内各油压峰值与针阀信号顶点对应。在提前角不变的情况下,随转速增大,针阀开启始点相位不断滞后,油压曲线波动逐渐减弱,喷油持续期内针阀逐渐可以保持开启状态。

(2) 电控单体泵在低速工况运行时,油压曲线波动剧烈,同时大脉宽工况的油压波动会“稳定”地遵循小脉宽时的油压波动规律。

(3) 均方差可以反映喷油量的循环变动特性,离散程度高低及循环喷油量变动大小与均方差大小成正比例关系。低转速工况下,随着转速的增大,喷油量变动逐渐减小。

参考文献:

[1] 高宗英,朱剑明. 柴油机燃料供给与调节[M]. 北京:机械工业

出版社,2011:3.

- [2] MORI K. Worldwide trends in heavy-duty diesel engine exhaust emission legislation and compliance technologies[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1997, 970753.
- [3] 王尚勇,杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005:3-6,33-35.
- [4] YANG M G, SORENSON S C. Modeling of the dynamic processes in an electronic diesel fuel injection system[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 1992, 9202400.
- [5] 范立云. 新型电控柴油喷射系统的开发与性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [6] 朱庆秋. 单次喷射测量仪的研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [7] 韦雄,冒晓建,肖文雍,等. 国产电控单体泵供油量精确测量与一致性规律分析[J]. 内燃机工程,2011,32(6):54-57.
- WEI X, MAO X J, XIAO W Y, et al. Accurate measurement and consistency analysis of fuel delivery for domestic electronic unit pump [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(6): 54-57.
- [8] 田丙奇,范立云,马修真,等. 电控单体泵全工况循环喷油量影响参数相关性分析[J]. 农业机械学报,2012,43(5):1-10.
- TIAN B Q, FAN L Y, MA X Z, et al. Influence factors correlation analysis on the electronic unit pump fuel Injection quantity in overall operating conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 1-10.
- [9] 仇滔,尹文辉,刘兴华,等. 低压油路对电控单体泵循环变动的影响试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):21-24.
- QIU T, YIN W H, LIU X H, et al. Effect of fuel supply loop for EUP's cyclic variation characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 21-24.
- [10] 范立云,宋恩哲,李文辉,等. 电控组合泵低压系统压力动态特性研究[J]. 内燃机学报,2010,28(2):147-154.
- FAN L Y, SONG E Z, LI W H, et al. Investigation on fuel pressure dynamic characteristic of the electronic control assembly pump low pressure system [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2): 147-154.

(编辑:姜文玲)