

# 柴油机电控组合泵系统喷油特性分析

程涛, 李琦, 朱钰

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 针对某中速柴油机燃油系统电控化改造, 采用 IFR600 喷油规律测量仪, 研究了喷孔直径、高压油管尺寸、泵出口节流、喷射背压和喷油器针阀开启压力对喷油规律、喷油量、循环喷油量波动及喷射延迟的影响。结果表明: 采用 0.26 mm 喷孔直径时, 喷油规律较好、喷射压力高, 循环喷油量的波动小; 采用新高压油管、有泵出口节流和高针阀开启压力时, 喷油速率和喷油量均减小, 但泵出口节流引起喷油量下降较大, 且喷射压力下降, 不宜采用; 喷射背压增大会引起喷油速率减小, 实际喷油规律与测量得到的喷油规律不同; 泵出口节流和高压油管尺寸对循环喷油量波动的影响显著; 各因素对喷射延迟均有影响, 但开始喷射延迟的变化小于结束喷射延迟。试验分析结果为该柴油机电控燃油系统的结构参数优化提供相关的理论依据。

**[关键词]** 中速柴油机; 电控组合泵; 喷油规律; 循环喷油量; 喷射延迟

**[中图分类号]** TK 421+.42

**[文献标志码]** A

## Experimental Analysis on the Fuel Injection Characteristic of Electronically Controlled Assembly Pump System of Diesel Engine

CHENG Tao, LI Qi, ZHU Yu

(Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In observation of equipping a medium speed diesel engine with an electronic control on its fuel system, the influence of sizes of nozzle and high-pressure oil tube dimensions, throttling from pump outlet, injection back pressure as well as injector valve open pressure were analyzed in terms of the fuel injection law, injection amount, quantity, the fluctuation of injection amount and the injection delay by using IFR600 fuel injection flow measurement device. It showed that injecting through a nozzle in diameter 0.26mm resulted in a better fuel injection characteristic and a weaker fluctuation of injection amount due to a higher injection pressure, the lower injection rate and fuel injection quantity were obtained with the new high-pressure oil tube, the pump outlet throttling and the high injector valve open pressure. It was not appropriate to be with the pump outlet throttling because the injection quantity and pressure decreased too much; the actual fuel injection law and the law obtained by the measurement device were different because the injection rate decreased along with the increase of the injection back pressure; the two factors of pump outlet throttling and high-pressure oil tube dimensions had remarkable effects on the fluctuation of cycle fuel injection quantity; all factors can affect the injection delay, and the variation of the opening delay is smaller than that of the closing delay.

**[收稿日期]** 2014-05-12

**[修回日期]** 2014-09-21

**[基金项目]** 福建省自然科学基金资助项目(2012J01230)

**[作者简介]** 程涛(1985—), 男, 硕士生, 从事内燃机性能优化研究。通讯作者: 朱钰(1965—), 女, 教授, 从事轮机工程研究。

The results of the experiment analysis provide the relevant foundation for the matching test of the electronic control fuel system for the diesel engine on optimization of structural parameters.

**Key words:** medium speed diesel engine; electronically controlled assembly pump; fuel injection law; cycle fuel injection quantity; injection delay

# 0 引言

燃油的喷射过程是柴油机燃烧过程中重要的一个组成部分，对柴油机的经济性、动力性和排放性影响大，喷油规律是评价燃油的喷射质量因素之一<sup>[1-2]</sup>。对于直喷式柴油机而言，传统理想的喷油规律是指：“先缓后急”的喷射方式。影响喷油规律的因素很多，国内外学者从不同的方面对此进行了研究<sup>[3-8]</sup>。

电控组合泵的喷油定时和喷油量都由电磁阀控制。然而，研究表明：由于油液的可压缩性、电磁阀性能及其他特性参数的影响，电控组合泵即使是在相同的电磁阀控制情况下，实际喷油开始和结束的时间也有可能不同，喷油量也会随着发生变化，这会影响柴油机性能的稳定，而这种变化应该在与柴油机匹配标定时以脉谱的形式进行补偿<sup>[9]</sup>；电控组合泵的循环喷油量对柴油机工作的稳定性会产生影响，文献[10-11]采用仿真模型研究了燃油系统参数对循环喷油量的影响。

4190Z<sub>L</sub>C 中速柴油机可以作为船舶发电柴油机或小型船舶的推进主机<sup>[12]</sup>。将其燃油系统改为电控组合泵。本研究就是针对该电控组合泵系统，利用不同的喷孔直径、高压油管尺寸、泵出口节流、喷射背压、喷油器针阀开启压力组合，对电控泵进行了喷射特性试验，分析喷油规律、循环喷油量波动、喷射延迟等特性，在结构参数优化方面指导电控燃油系统与柴油机的匹配与标定工作。

# 1 研究方法

该电控燃油系统由 EP14-30102 电控组合泵、高压油管和喷油器组成。其中：高压油管有二种规格，新、旧油管的长度×内径×外径分别为 820 mm×2 mm×6 mm 和 900 mm×1.8 mm×6.3 mm；喷油器有三种规格，均为 8 个喷孔，喷孔直径分别为 0.26 mm、0.28 mm 和 0.30 mm。系统喷射特性试验在 6PSDW300 油泵试验台上进行，测量单元采用 IFR600 喷油规律测量仪，单次喷射测量精度为 ±0.2 mm<sup>3</sup>，电控组合泵的电磁阀由 EFS8427 驱动模块控制。试验台架及测量原理如图 1 所示。

试验条件：燃油温度 40 ℃，工作转速 500 r/min，喷油持续角 15.5°CaA。试验分 4 组，方案见表 1。

表 1 试验方案  
Tab. 1 Testing program

试验方案 Testing program	喷孔直径 Nozzle diameter /mm	高压油管 High-pressure oil tube dimensions	泵出口节流 Pump outlet throttling	喷射背压 Injection back pressure /MPa	开启压力 Valve open pressure /MPa
1	0.26,0.28,0.30	新	无	2	18.8
2	0.26	旧	无	2	18.8
3	0.26	新	有	2,4,6,8,10	18.8
4	0.26	新	无	2	19.8,20.8,21.8

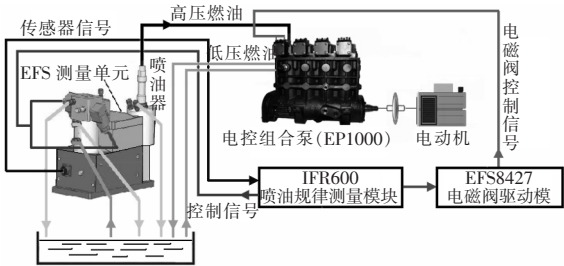


图 1 试验台架及测量原理图  
Fig.1 Test bench and measurement principle diagram

2 试验结果及分析

2.1 喷油规律和喷油量的影响分析

喷油规律与柴油机燃油系统的结构以及柴油机本身运行工况有关<sup>[13-15]</sup>。笔者主要研究喷孔直径、高压油管、泵出口节流、喷射背压、喷油器针阀开启压力等因素对喷油规律和喷油量的影响。图 2—图 6 为这些因素变化时, 通过实验得到的喷油速率和喷油量的变化曲线。

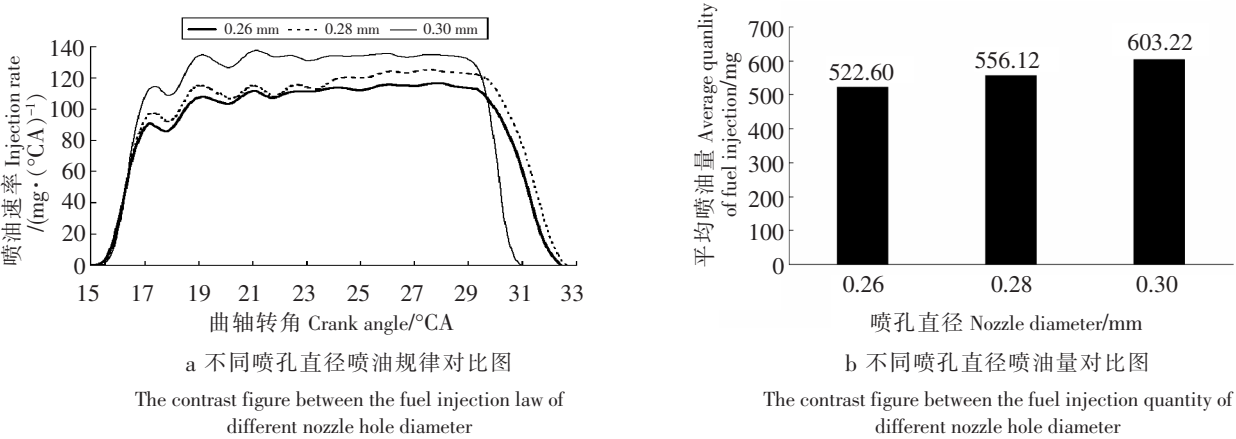


图 2 喷孔直径的影响  
Fig.2 Effect of nozzle diameter

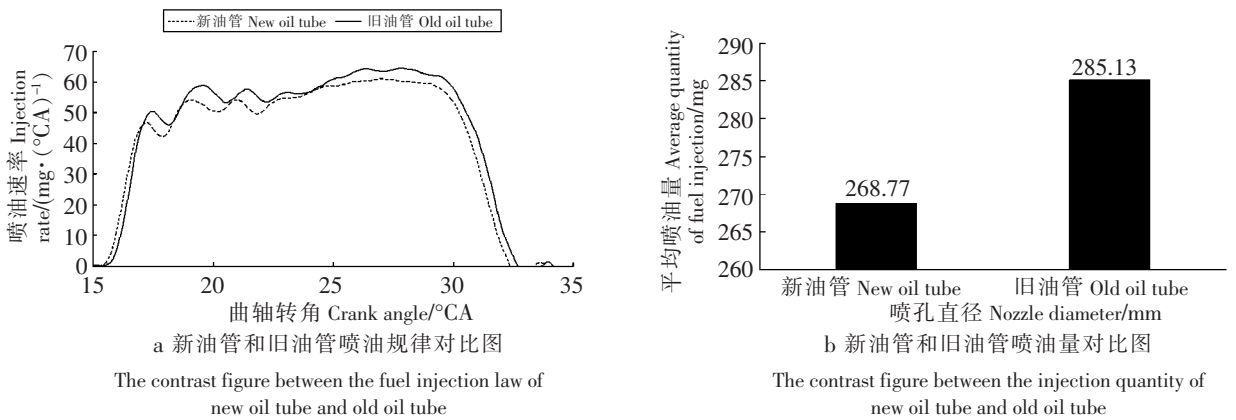


图 3 高压油管的影响  
Fig.3 Effects of high-pressure oil tube

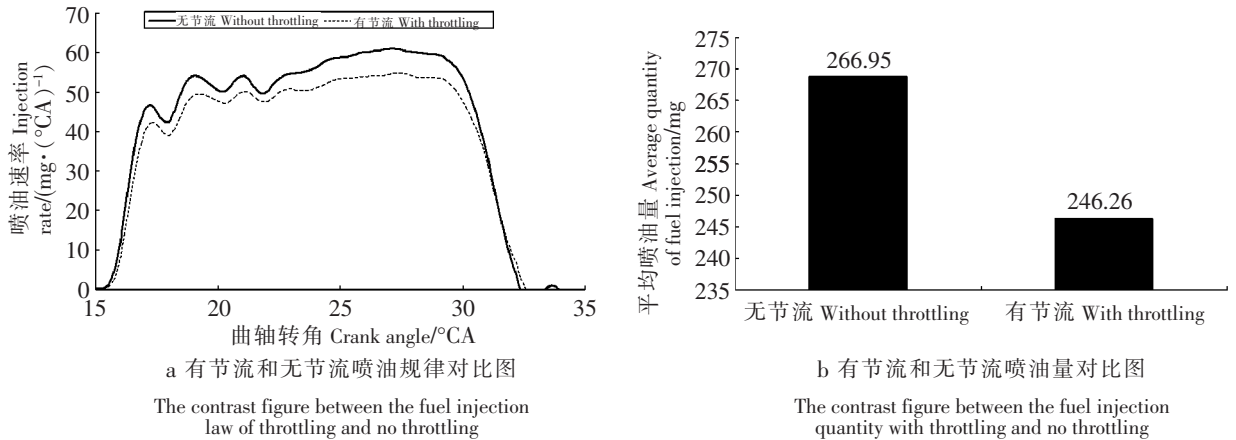
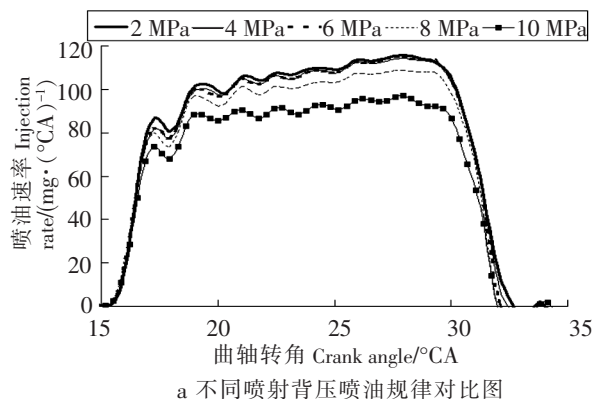
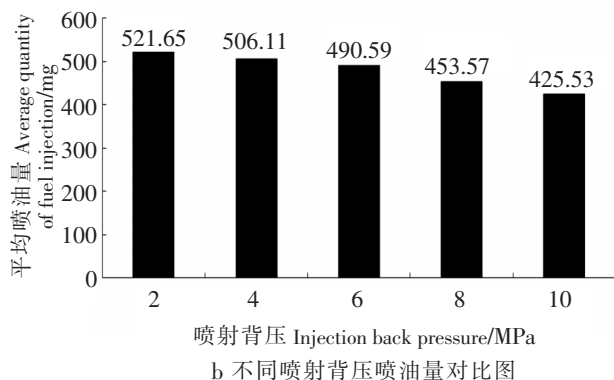


图 4 泵出口节流的影响  
Fig.4 Effects of pump outlet throttling



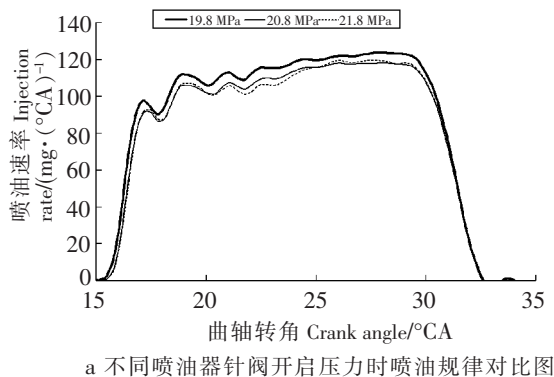
The contrast figure between the fuel injection law of different injection back pressure



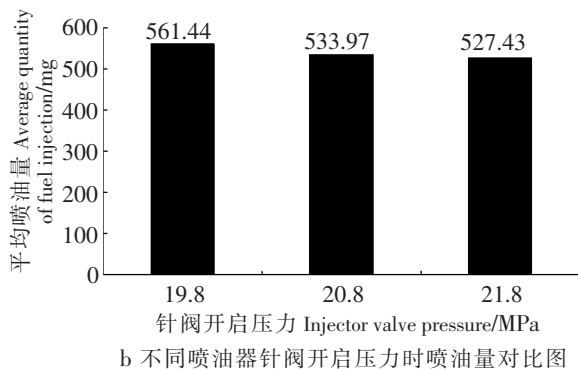
The contrast figure between the fuel injection quantity of different injection back pressure

图 5 喷射背压的影响

Fig.5 Effects of injection back pressure



The contrast figure between the fuel injection law of different injector valve open pressure



The contrast figure between the fuel injection quantity of different injector valve open pressure

图 6 针阀开启压力的影响

Fig.6 Effects of injector valve open pressure

由图 2 可以看出: 喷孔直径减小, 喷油速率和喷油量减小, 但喷油持续期并没有单调性增加. 喷孔直径由 0.30 mm 减小到 0.26 mm, 喷孔流通面积减小 24.8%, 导致喷射阻力增大, 喷油速率因而相应减小, 相同供油持续角的喷油量减小, 但减小的幅度仅为 13.3%, 造成这个结果的原因应该是燃油喷射压力随喷孔减小而增加了, 这一点有利于喷入缸内的燃油雾化; 采用 0.30 mm 喷孔直径时, 喷油持续期最短, 喷油结束也快, 有利于提高柴油机的经济性, 但喷油初期的喷油速率高, 柴油机工作不平稳, 且  $\text{NO}_x$  排放会增加; 采用 0.28 mm 喷孔直径时, 喷油持续期最长, 不利于柴油机经济性提高, 原因是此时电磁阀的关闭延迟最大; 随喷孔直径的减小, 初期喷油速率下降较快, 有利于减小滞燃期内喷入的气缸的燃油量, 对柴油机的平稳运转及降低  $\text{NO}_x$  的排放有利. 由此试验可知: 采用 0.26 mm 喷孔直径的喷油器进行柴油机的匹配试验, 最有可能得到较优的经济性和低的  $\text{NO}_x$  排放.

在喷油工作中, 高压油管承受着高压脉动负荷及振动. 由图 3 可以看出: 当换取新油管后, 喷油速率和喷油量减小, 喷油持续期也略微减小. 新油管的长度减小, 但内径增加, 管壁变薄, 总容积较旧油管增加了 12%, 油液可压缩性及管壁弹性的影响均增加, 喷油速率和喷油量均减小应该是因为喷油压力下降所致. 由于油液压缩性、管壁弹性及压力波的影响非常复杂, 在与柴油机匹配标定时, 应该进行二种油管的试验, 并根据柴油机的性能确定采用新或旧高压油管.

由图 4 可以看出: 有泵出口节流时, 喷油速率减小 (后期喷油速率的减小程度大于初期), 喷油

量下降8.4%,但喷油持续期几乎不变。有节流时,泵的供油阻力增加,燃油喷射压力会下降,不利于喷入气缸内的燃油雾化,故宜采用无泵出口节流与柴油机匹配试验。

IFR600 喷油规律测量仪的喷油规律测量,只能在某一确定的背压下进行,而柴油机的实际缸压是随曲轴转角变化的,在整个喷油持续期内是不断上升的。因此,油泵试验台上测得的喷油规律与实际喷油规律会有一定的差距。图5显示:随喷射背压的增大,喷油速率会下降(喷射后期喷油速率下降幅度较大),喷油持续期会减小,喷油量也减小。实际喷油速率在喷油初期与小背压时接近,而在喷油后期则与大背压时接近,实际喷油量也会小于试验台测得的喷油量。

由图6可以看出:随喷油器针阀开启压力的增大,喷油速率和喷油量均略有减小,喷油持续期因开始喷油时间推迟而略有减小,针阀开启压力增加10%,喷油量仅减小6.06%。因为针阀开启压力增加,阻力增加,高压油管内的压力需更高才能打开针阀开始喷油,所以开始喷油的时间推迟了;燃油压力的提高在一定程度上补偿了因阻力增加而减小的喷油速率。由此可见:进行柴油机匹配试验时,采用较高的针阀开启压力是有利的。

2.2 循环喷油量波动规律特性分析

循环喷油量波动的分析通过对50个循环的喷油量数据进行方差计算所得( $s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{average})^2 / n$ ),比较某因数变化时方差的变化,方差越小代表循环喷油量的波动越小,柴油机的运转越稳定。图7—图12是不同因素变化时循环喷油量的方差比较。

图7显示:当喷孔直径为0.3 mm时,循环喷油量的波动最小;但由2.1节分析可知,0.3 mm喷孔直径对柴油机工作的平稳性和NO<sub>x</sub>的排放均不利,故选择0.26 mm的喷孔直径优于0.28 mm的喷孔直径。图8—图11的对比结果显示:从循环喷油量波动小的角度考虑,应该选用旧高压油管、带泵出口节流、高喷射背压及高的喷油器针阀开启压力。图12显示每个喷油循环下各因素的参数变化的循环喷油量波动方差值,发现泵出口节流和高压油管二因素变化时,循环喷油量波动的变化大;针阀开启压力、喷射背压及喷孔直径三个因素对循环喷油量波动的影响较小。

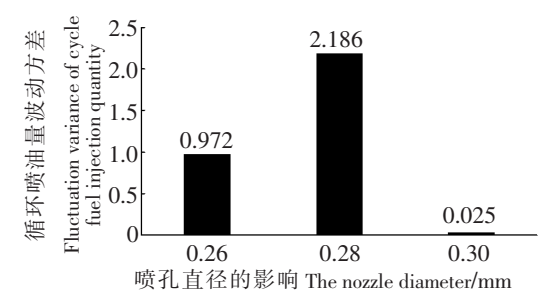


图7 喷孔直径的影响

Fig.7 Effects of nozzle diameter

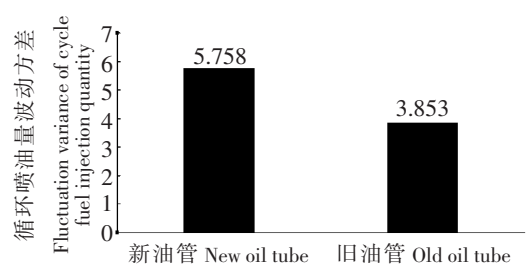


图8 高压油管尺寸的影响

Fig.8 Effects of high-pressure oil tube dimensions

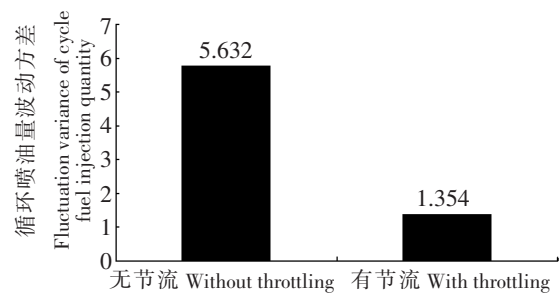


图9 泵出口节流的影响

Fig.9 Effects of pump outlet throttling

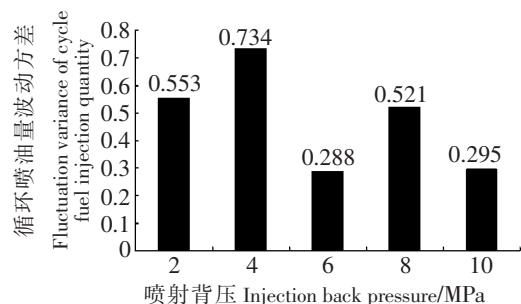


图10 喷射背压的影响

Fig.10 Effects of injection back pressure

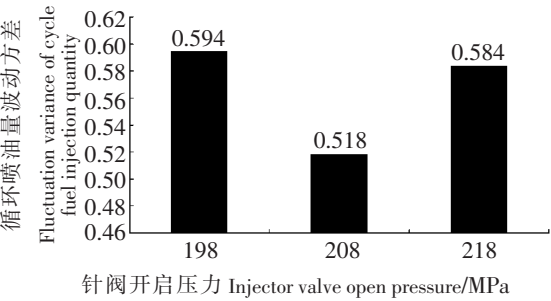


图 11 喷油器针阀开启压力的影响

Fig.11 Effects of injector valve open pressure

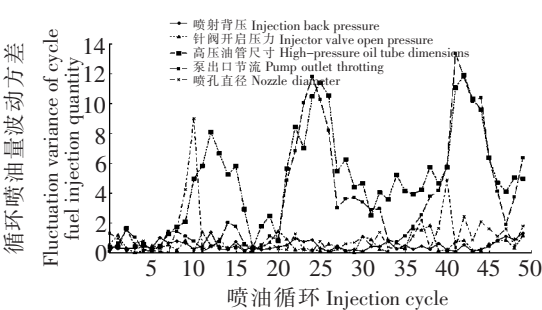


图 12 不同因素循环喷油量波动方差对比图

Fig.12 The comparison chart among the cycle fuel injection quantity fluctuation variance of different factors

2.3 喷油延迟特性分析

电液延迟特性的研究对喷油正时控制策略的制定具有重要意义，通过将电液延迟特性制作成延迟脉谱，修正柴油机喷油定时脉谱，可以准确地控制燃油喷入气缸的时刻及喷油结束时刻，实现喷油正时和喷油量的精确控制。表 2 为试验得到的在相同电磁阀控制定时下，各因素变化时 50 个循环的开始喷射延迟和结束喷射延迟平均值。开始喷射延迟（opening delay）是指电磁阀关闭脉冲信号发出与喷射开始之间的时间差，结束喷射延迟（closing delay）是指电磁阀开启脉冲信号发出与喷射结束之间的时间差。

表 2 燃油系统结构参数 50 个循环的喷射延迟平均值  
Tab.2 The mean time of jet lag of 50 cycle for structural parameters

燃油系统结构参数 Structural parameters of the fuel system	喷孔直径 Nozzle diameter /mm	高压油管 High-pressure oil tube dimensions	泵出口节流 Pump outlet throttling	喷射背压 Injection back pressure /MPa	开启压力 Valve open pressure /MPa
试验条件 Test condition	0.26,0.28,0.30	新,旧	无,有	2,4,6,8,10	19.8,20.8,21.8
开始喷射延迟平均 值 The mean time of opening delay/ $\mu$ s	1869,1915,1918	1893,1956	1893,1928	1907,1911,1892, 1883,1868	1907,1913,1933
结束喷射延迟平均 值 The mean time of closing delay/ $\mu$ s	2363,2411,1782	2360,2450	2360,2451	2405,2367,2274, 2236,2219	2412,2388,2380

由表 2 可以看出：随着喷孔直径的增大，开始喷射延迟时间增大；因为随孔径的增大，泵端压力、嘴端压力将会减小，喷油器的启喷压力的建立时间变长，导致开始喷油延迟变长。采用 0.28 mm 的喷孔直径时的结束喷射延迟最大，而采用 0.3 mm 喷孔直径时，结束喷油延迟最小，甚至比开始喷射延迟还小 103.6  $\mu$ s，且单循环的结束喷射延迟波动很大。分析原因应该是 0.3 mm 喷孔开启喷油后压力下降大。

采用新油管后，开始和结束喷射延迟均减小，因为新油管的长度减小了，压力波传递距离减小。

有泵出口节流时的开始和结束喷射延迟都比无节流时的时间长。这是因为在有节流的情况下，高压油管内部压力较小，喷油器的启喷压力的建立时间变长，导致开始喷射延迟时间变长。同样，在有节流的情况下，高压油管内部压力下降受阻，所以导致结束喷射延迟时间变长。

喷射背压的变化对开始喷射延迟的影响很小，但对结束喷射延迟有一定的影响，随喷射背压增加，结束喷射延迟减小。

随着针阀开启压力的增大，开始喷射延迟增加，而结束喷射延迟减小。

喷射延迟随各因素的变化均有一定程度的变化，要得到延迟脉谱必须在确定所有因素之后进行完



整的试验.

### 3 结论

1) 采用 0.26 mm 的喷孔直径时,初期喷油速率小,喷油压力高,有利于燃烧和降排,且循环喷油量的波动也较小,有利于柴油机的稳定运行;2) 采用新高压油管喷射时延迟减小,初期喷油速率较小,但喷油量减小,循环喷油量的波动增加;3) 采用泵出口节流和较大的喷油器针阀开启压力,均会导致喷油速率、喷油量和循环喷油量波动的减小,但泵出口节流引起的喷油量下降较大,且喷油压力会下降,故与柴油机的匹配试验时不宜采用泵出口节流,但可以采用较高的喷油器针阀开启压力;4) 喷射背压增加导致喷油速率和喷油量下降,实际喷油规律与试验台测量得到的规律不同,后期喷油速率会较小;5) 泵出口节流和高压油管尺寸对循环喷油量波动的影响显著;6) 该电控泵燃油系统的开始喷射延迟小于结束喷射延迟,各因素变化时对开始喷射延迟的影响也小于对结束喷射延迟的影响,延迟脉谱需要在确定各因素的取值之后进行试验确定.

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 何学良,李疏松. 内燃机燃烧学 [M]. 北京:机械工业出版社,1990:147.
- [2] 孙培廷. 船舶柴油机 [M]. 大连:大连海事大学出版社,2002:84-108.
- [3] 邹家勇. 柴油机喷油规律分析 [J]. 湖南农机,1999(1):19-20.
- [4] BENAJES J, PASTOR JV, PAYRI R, et al. Analysis of the influence of diesel nozzle geometry in the injection rate characteristic [J]. Transactions of the ASME-I-Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 63 - 71.
- [5] 刘兴华,王裕鹏,陈宇航,等. 电磁阀驱动电流对喷油特性影响规律研究 [J]. 北京理工大学学报,2011, 31(5): 514-518.
- [6] 袁方恩,林学东,田维,等. 高压共轨喷油器电磁系统对喷油规律的影响 [J]. 汽车技术,2010(7): 6-10.
- [7] DERNOTTE J, HESPEL C, FOUCHER F, et al. Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector [J]. Fuel, 2012, 96: 153-160.
- [8] DESANTES J M, BENAJES J, MOLINA S, et al. The modification of the fuel injection rate in heavy-duty diesel engines. Part 1: Effects on engine performance and emissions [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(17): 2701-2714.
- [9] 吴水长,杨时威,隆武强,等. 电控单体泵系统喷射延迟特性研究 [J]. 机械科学与技术,2010, 29(5): 616-620.
- [10] 范立云,朱元宪,隆武强,等. 电控组合泵循环喷油量波动的量化分析 [J]. 内燃机学报,2008, 26(3): 264-271.
- [11] YAO CHONG, FAN LI-YUN, DONG QUAN, et al. Correlation analysis of factors influencing the electronic unit pump cycle fuel injection quantity under overall operating conditions for diesel engines [J]. Journal Of Mechanical Science And Technology, 2012, 26(9): 2929.
- [12] 高占斌,张天野,陈辉. 4190ZLC 柴油机自由加速烟度排放研究 [J]. 集美大学学报:自然科学版,2007, 12(4): 331-334.
- [13] 李华莹,刘建敏,郭猛超. 喷嘴参数对柴油机喷油规律与性能的影响 [J]. 中国工程机械学报,2012, 10(2): 242-247.
- [14] 刘红彬,骆清国,司东亚,等. 高压共轨系统结构参数对喷油规律影响的研究 [J]. 汽车工程,2014, 36(1): 28-31.
- [15] 李晓珍,刘仁鑫,蒋天弟. 不同出油阀对喷油规律影响的试验分析 [J]. 农机化研究,2003, 4: 178-179.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 陈 武)