

不同启喷压力下柴油机喷油特性预测研究

刘 瀚¹, 刘 镇¹, 常汉宝¹, 张晓峰²

(1. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033; 2. 91630 部队, 广州 510415)

摘 要: 建立了柴油机可控启喷压力喷油器燃油喷射系统液力模型, 并进行仿真计算; 利用 CB-466 燃烧分析仪测试该燃油喷射系统的喷油器针阀升程和喷油器端高压油管燃油压力, 与仿真计算结果对比, 验证了仿真模型和计算方法的可信性; 在此基础上就不同启喷压力下柴油机喷油特性进行了预测研究。结果表明: 启喷压力增大使得喷油延迟, 喷油压力增大, 燃油的喷雾质量改善。

关键词: 柴油机; 启喷压力; 喷油特性; 模拟计算

中图分类号: TK423.8⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)05-0013-06

The Prediction Research on the Diesel Engine's Inject Characteristics of Different Fuel Starting Injection Pressure

Liu Han¹, Liu Zhen¹, Chang Hanbao¹, Zhang Xiaofeng²

(1. College of Marine and Power, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033;

2. Naval Unit 91630, Guangzhou 510415)

Abstract: A hydraulic simulation model was applied to the fuel injection system of diesel engine with controllable fuel starting injection pressure, and used to simulate injection process. The injector needle lifts and the injection pressure of high pressure fuel pipe at the injection end were recorded through experiments of the pressure fuel injection system with CB-466 combustion analyzer and brought into comparison with the computed results, thus verifies the simulation model and calculation method. Then, the model was used to discuss the effect of the fuel starting injection pressure on a diesel engine's injection characteristics. The results showed that in the condition of higher fuel starting injection pressure, the time of fuel starting injection was delayed, the pressure fuel injection was higher and the spray characteristics was improved.

Keywords: diesel engine; fuel starting injection pressure; inject characteristics; simulation calculation

1 前 言

柴油机最常用的是泵-管-嘴喷油系统, 在该系统其他参数一定及工况相同的情况下, 喷油器启喷压力的大小决定了喷油压力的大小。理论及试验研究表明, 采用高压喷射、提高喷油速率可改善喷

雾, 进而改善燃烧, 提高平均有效压力和降低排放^[1-3]。

对于定启喷压力喷油器柴油机, 当其在额定工况下工作时, 喷油雾化燃烧良好。而在中低工况下工作时, 首先由于循环喷油量较小, 喷油压力低, 致使雾化不良; 其次, 喷油压力与转速平方成正

比,低转速时,喷油压力下降更多,雾化质量更差,不利于燃烧^[4]。为了改善柴油机低工况性能,1983~1984年,日本三菱重工横滨制作所把可控启喷压力喷油器技术成功应用于三菱 6UEC52L 型柴油机中^[5]。在柴油机处于低负荷低转速时,该技术使喷油器的启喷压力升高,从而提高喷油压力,使柴油机喷雾及燃烧特性得到改善。该项技术在此后也有不断应用,如 1996 年,国内殷慧农等对 12E396VA 型柴油机进行液控启喷压力喷油器的改造研究。这些变启喷压力喷油器与目前研究应用的电控喷油器相比,具有结构简单,易于实现,成本低的优点,且对改善柴油机低工况性能有突出的作用。

本文建立了可控启喷压力燃油喷射系统液力仿真计算模型,就不同启喷压力下柴油机喷油特性进行仿真计算,分析不同启喷压力下喷油特性的变化规律,为下一步研究可控启喷压力喷油器的控制策略提供支持。

2 可控启喷压力燃油喷射系统的建模

2.1 可控启喷压力喷油器结构及工作原理

可控启喷压力喷油器结构如图 1(左)所示,喷油器上端设置了一个连接控制空气的串联控制活塞,可通过控制活塞行程的变化来改变喷油器调压弹簧的预紧力,进而控制启喷压力^[5]。

喷油器针阀开启工作原理如图 1(右)所示,当从高压油管流进的燃油压力高于启喷压力时,喷油器针阀抬起,高压燃油流进喷嘴压力室,通过喷嘴喷孔喷出。喷油器启喷压力计算公式如下式所示:

$$p_{j0} = \frac{F_0 - \frac{\pi}{4} d_j^2 p_{cyl}}{\frac{\pi}{4} (D_j^2 - d_j^2)}$$

式中: p_{j0} 为启喷压力; F_0 为喷油器调压弹簧的预紧力; D_j 为针阀阀杆直径; d_j 针阀阀座直径; p_{cyl} 为气缸压力。当其他参数不变时,可以通过调整喷油器调压弹簧的预紧力,来调整喷油器启喷压力。

当可控启喷压力喷油器充入控制空气后,控制活塞下行,调压弹簧预紧力增大,从而使启喷压力升高;相反,当排出控制空气后,活塞上行,调压弹簧预紧力减小,就使启喷压力下降。

2.2 可控启喷压力燃油喷射系统模型

所研究的高压燃油喷射系统与传统泵-管-嘴燃油喷射的结构形式类似,也分为喷油泵、高压油

管和喷油器三个部分。图 2 是建立的柴油机可控启喷压力喷油器燃油喷射系统液力模型,整个模型由 21 个单元组成。喷油泵抽象成包括凸轮、柱塞、柱塞泄漏、柱塞腔、进回油孔、出油阀、出油阀腔以及低压边界。其中低压边界包括供油压力和泄漏背压,出油阀使用等容出油阀模型。为了达到计算精度,并综合求解时间等因素后高压油管选定古德诺夫管模型。它的计算精度较好,对实际情况模拟较为真实,同时花费的求解时间也在可接受的范围内。喷油器抽象成包括喷嘴、针阀、泄漏、容积,以及缸内及针阀的边界条件,喷嘴内的油道抽象成管单元。

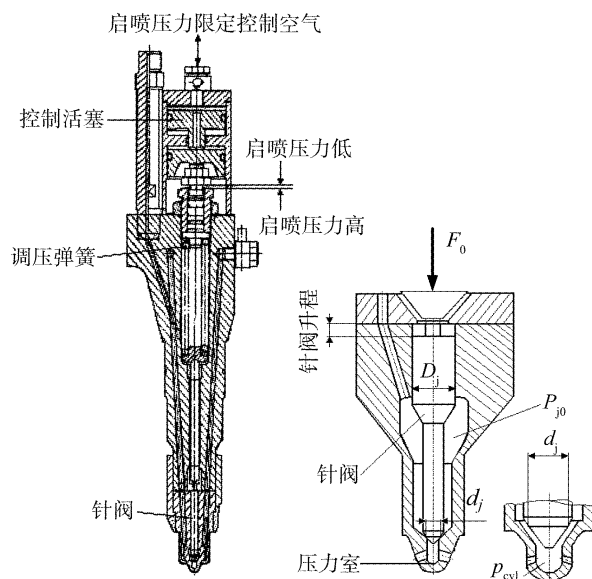


图 1 可控启喷压力喷油器的结构原理

针阀与边界条件间的调压弹簧简化为一机械连接,因此,可以通过调整此机械连接的预加力载荷(即调压弹簧的预紧力),来调整喷油器启喷压力。

该燃油系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 燃油系统主要结构参数

低压油泵供油压力/MPa	0.15
喷油泵柱塞直径/mm	9
高压油管内径×长度/mm	Ø2×750
针阀最大升程/mm	0.45
喷孔数目×直径/mm	4×0.35
喷孔长度/mm	1.1

计算模型中所需要输入的其他参数,根据图纸实际值输入或相关经验公式计算得出。模型中油滴平均直径计算选择 Eiktob 公式,喷射圆锥角计算选择 Sitkei 公式,贯穿距离选择 Varde, Popa 公式。

该仿真计算模型可进行不同启喷压力下喷油系统的喷油压力、喷油规律、喷雾特性的计算。

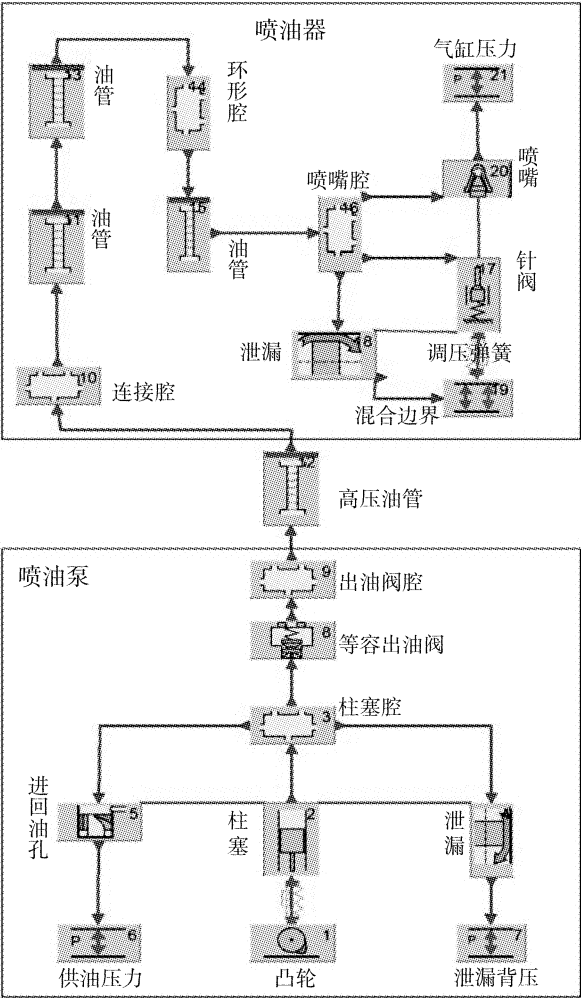


图2 燃油喷射系统仿真计算模型

3 仿真计算模型的试验验证

为提高仿真计算的精度，依照本文所建立的柴油机喷射系统液力模型进行仿真计算的结果，与试验数据进行了对比，以验证计算模型的可信性。在此基础上再开展不同启喷压力下喷油系统的喷油特性仿真计算和性能预测。实验所用柴油机为 6-135 型柴油机，其额定工况标定启喷压力为 17 MPa。

在试验台上利用 CB-466 燃烧测试分析仪对燃油喷射系统进行了试验测试，测试项目包括喷油器端高压油管燃油压力、针阀升程和循环喷油量。测试中改变喷油器内调压弹簧的预紧力来改变启喷压力，改变油泵齿条位置来改变循环喷油量。图 3、4 为两工况下试验测得高压油管燃油压力、针阀升程与相应模型仿真计算结果的对比图。工况 1 凸轮轴转速为 700 r/min，循环喷油量为 0.09 g，启喷

压力为 24 MPa；工况 2 凸轮轴转速为 500 r/min，循环喷油量为 0.051 g，启喷压力为 24 MPa。

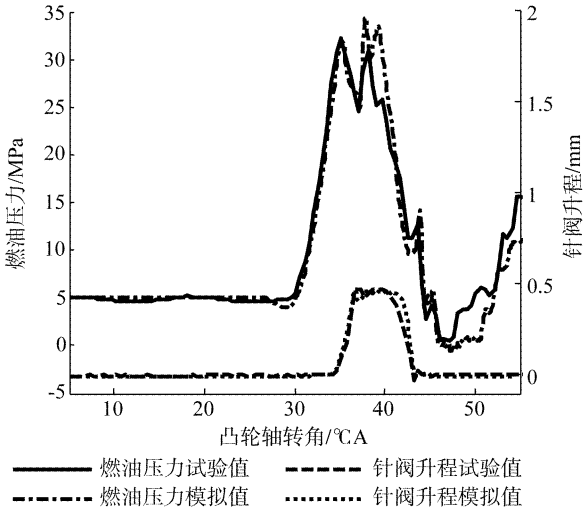


图3 工况1

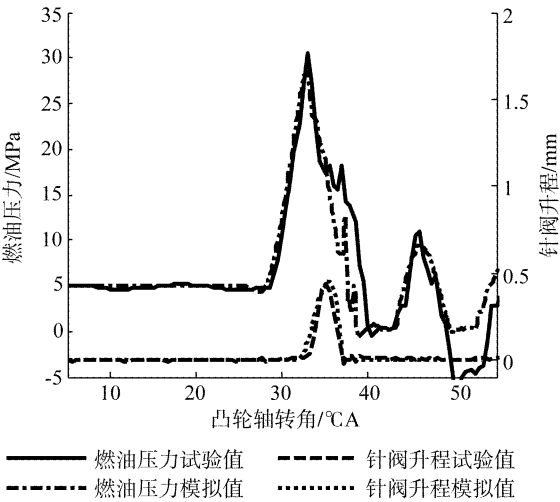


图4 工况2

从对比曲线整体和燃油峰值压力和喷油持续期（如表 2 所示）上看，燃油压力和针阀升程的模拟仿真结果与试验结果都比较吻合，从而验证了仿真计算模型的可信性和适用性。

表2 燃油峰值压力和喷油持续期对比

工况	燃油峰值压力/MPa		喷油持续期/（°）	
	试验值	模拟值	试验值	模拟值
1	34.2	34.9	9.25	9.4
2	30.5	29.1	5.0	5.5

4 仿真计算与结果分析

4.1 启喷压力对喷油压力的影响

循环喷油量为 0.092 g 时，启喷压力为 17、24、

28 MPa 的喷嘴腔燃油压力变化如图 5 所示, 左图喷油泵凸轮轴转速为 700 r/min, 右图 500 r/min。从图中可以看出, 随着启喷压力从 17 MPa 增大到 28 MPa, 燃油压力逐渐增大, 压力波动变化逐渐减小, 而且在喷射初期和后期压力升高非常显著, 低转速时压力波动减小更加明显。

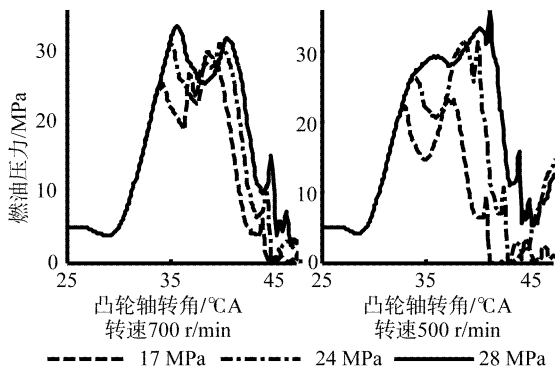


图 5 启喷压力对喷嘴腔燃油压力影响

图 6 为不同工况下, 启喷压力对喷嘴腔燃油峰值压力的影响。燃油峰值压力随着启喷压力增大逐渐增大, 而且随着转速和循环喷油量的降低增加幅度越来越大。如图 6 所示, 启喷压力从 9 MPa 增大到 28 MPa, 在凸轮轴转速 700 r/min 循环喷油量为 0.092 g 时, 燃油峰值压力由 28.2 MPa 增大到 33.6 MPa, 增加了 19%, 而在转速 400 r/min 喷油量为 0.052 g 时, 燃油峰值压力由 13.5 MPa 增大到 33.8 MPa, 增加了 150%。

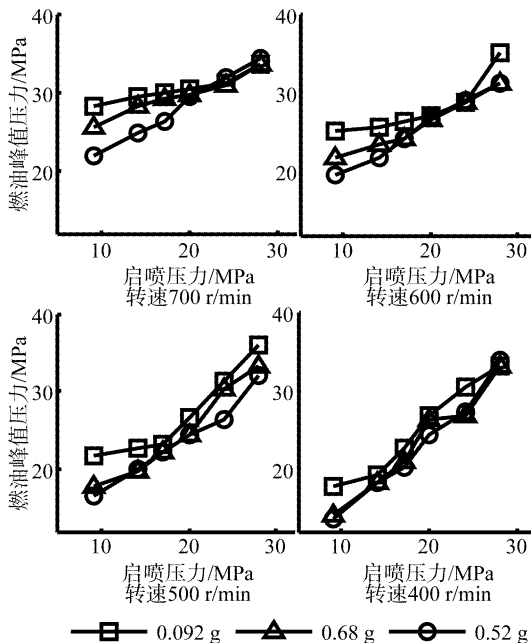


图 6 燃油峰值压力变化图

4. 2 启喷压力对喷油规律的影响

图 7 为启喷压力对喷油器喷油率的影响变化。

凸轮轴转速为 700 r/min, 循环喷油量为 0.092 g 时, 随着启喷压力的提高, 喷油延迟增大。这是由于启喷压力变大, 造成高压燃油系统的建压时间增长, 燃油进入气缸的实际时刻推后, 喷油滞后引起的。

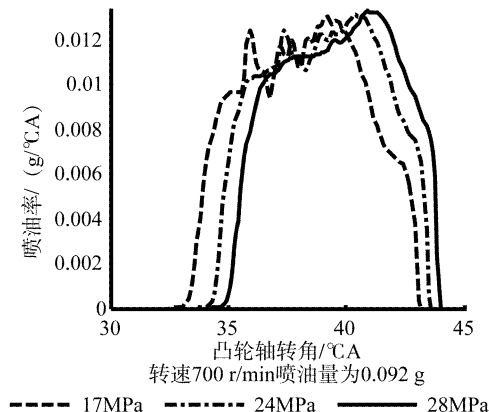


图 7 启喷压力对喷油率的影响

图 8 为循环喷油量对喷油器喷油率的影响变化。凸轮轴转速为 500 r/min, 启喷压力为 17 MPa 时, 循环喷油量对喷油延迟和初期喷油率没有影响, 循环喷油量的增加使喷油停止的角度后延, 从而延长喷油持续期。

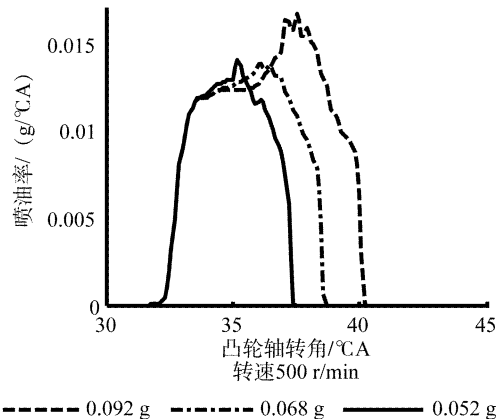


图 8 循环喷油量对喷油率的影响

图 9 反映了不同转速下启喷压力对喷油启喷角的影响。转速越低, 启喷压力的提高使喷油延迟增大的增量变大。凸轮轴转速为 700 r/min 时, 启喷压力从 9 MPa 增大到 28 MPa, 喷油后延增加了 2.4 °CA, 而 400 r/min 时, 喷油后延增加了 6.0 °CA。这是由于低速时因建压速度相对较慢, 所以延迟增大明显, 而高速时燃油系统的快速建压补偿了高启喷压力值对喷油后延的影响。

4. 3 启喷压力对喷雾特性的影响

图 10 为启喷压力对喷雾特性的影响。从油滴

细微度上看, 提高启喷压力可显著减小喷射初期和后期液滴平均索特直径 (SMD)。从油束形态上看, 提高启喷压力可增大喷射初期和后期喷射贯穿距和喷雾锥角。将有利于改善喷射开始、结束阶段油雾化质量。这是由于启喷压力提高后, 喷射初期和后期压力明显升高 (见图 5), 使燃油在喷射处的喷出速度提高, 与缸内气体相对速度的增大, 有利于油滴的破碎和增大喷射燃油的混合区域, 提高混合气形成和燃烧性能的改善。

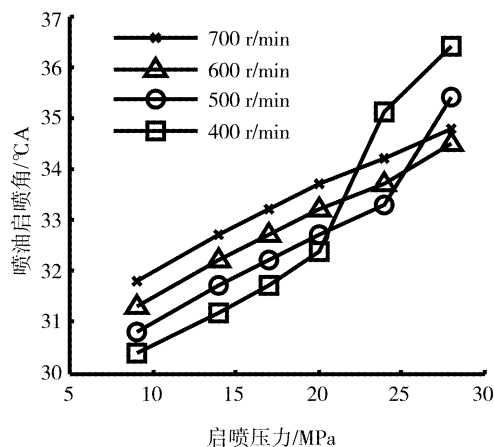


图 9 启喷压力对启喷角的影响

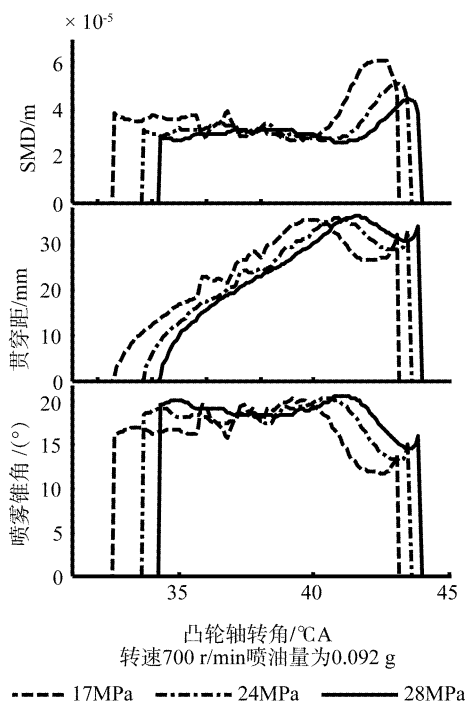


图 10 启喷压力对喷雾特性的影响

图 11 ~ 13 为各工况下启喷压力对从喷油开始到喷油结束整个喷油期间内的油滴平均索特直径 (平均 SMD)、平均喷雾锥角和平均贯穿距的影响。整个喷油期间内油滴平均 SMD 随着启喷压力

增大逐渐减小, 而且随着转速和循环喷油量的降低减小幅度越来越大。如图 11 所示, 启喷压力从 9 MPa 增大到 28 MPa, 在凸轮轴转速 700 r/min 循环喷油量为 0.092 g 时, 平均 SMD 由 4.2×10^{-5} m 减小到 3.1×10^{-5} m, 减小了 27%; 而在转速 400 r/min 喷油量为 0.052 g 时, 平均 SMD 由 6.0×10^{-5} m 减小到 3.1×10^{-5} m, 减小了 48%。

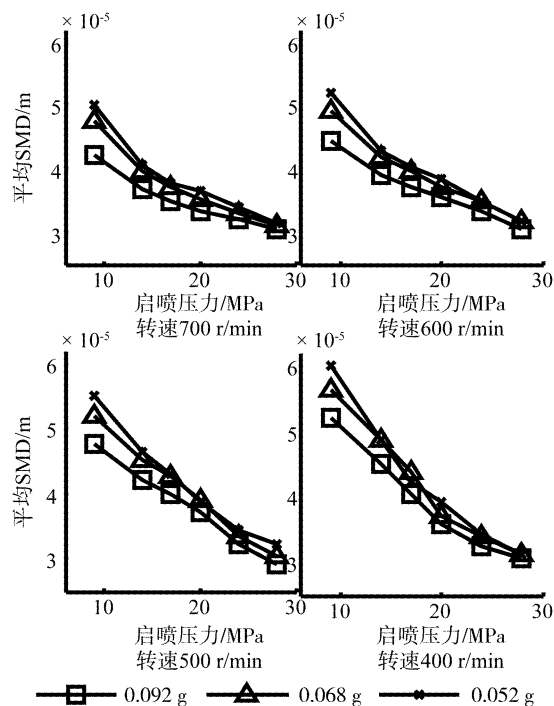


图 11 启喷压力对整个喷油期间内油滴平均 SMD 的影响

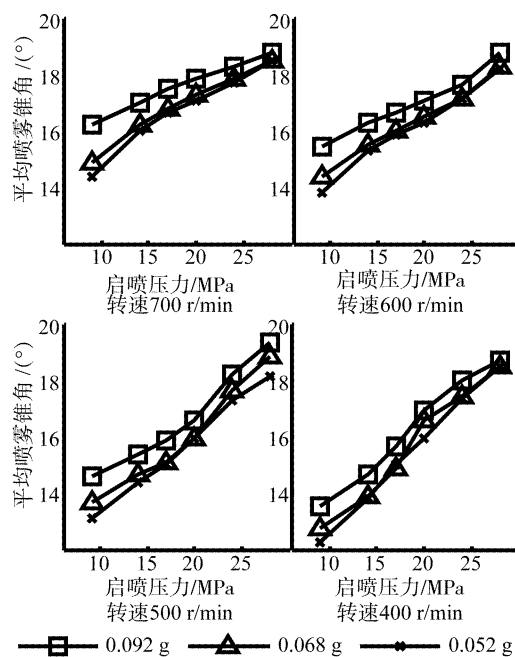


图 12 启喷压力对整个喷油期间内平均喷雾锥角的影响

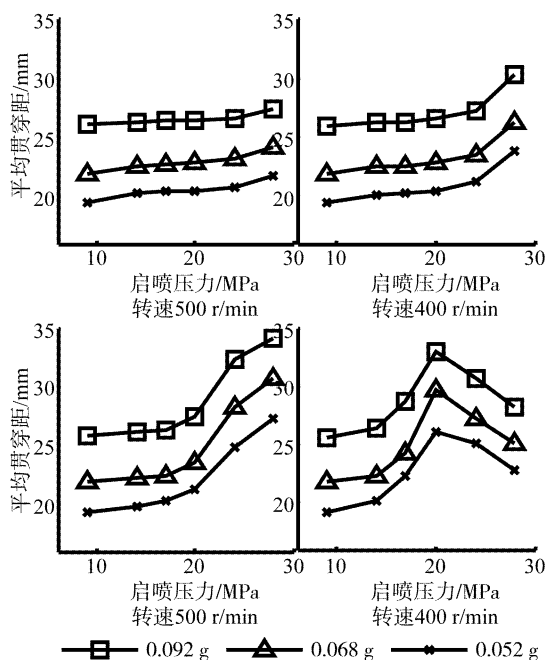


图 13 启喷压力对整个喷油期间内平均贯穿距的影响

整个喷油期间内油滴平均喷雾锥角在各工况下都随着启喷压力增大而增大。平均贯穿距在高转速下(700 r/min)随着启喷压力提升增大幅度不明显,随着转速降低平均贯穿距增大幅度变大,而在低转速(400 r/min)时,在启喷压力为 20 MPa 出现转折,在此之前平均贯穿距随启喷压力增大而增大,而后减小。

5 结 论

(1) 依照本文所建立的柴油机喷射系统液力模型进行仿真计算的结果与试验数据进行了对比,显示二者吻合度较好,验证了仿真计算模型的可行性和适用性。

(上接第 4 页)

前两个脉冲工作期间,五种工况下的最大动态调速率分别为 4.0%、3.2%、2.8%、3.2%、4.0%。

5 结 论

在试验验证的基础上,建立了电控泵管嘴燃油喷射柴油机的动态仿真模型。研究了不同 PID 参数及首脉冲负载加载前机组提前加速对机组性能的影响,仿真结果可用来指导机组现场试验中的 PID 参数整定和控制策略制定,节省大量的试验工作。仿真结果显示,在理想的 PID 参数和控制策略下,机组的动态调速率可达到 2.8%。

参考文献

[1] 何建辉,王波涛,张阿庆,等. 单缸柴油机高压共轨燃油

(2) 启喷压力对燃油系统喷油特性有重要的影响,提高启喷压力可使喷油滞后,燃油喷射压力提高,改善雾化质量,特别是明显减小喷射初期和后期油滴 SMD,增大了喷射初期和后期喷射贯穿距和喷雾锥角。

(3) 启喷压力提高对喷雾特性的改善与柴油机工况也有关系,低工况性能改善效果要明显优于高工况。在本文中,启喷压力从 9 MPa 增大到 28 MPa,高工况时,喷油峰值压力增加了 19%,油滴平均 SMD 减小了 27%;而低工况时,喷油峰值压力增加了 150%,油滴平均 SMD 减小了 48%。

(4) 利用该仿真计算模型,可对不同工况下的不同启喷压力时柴油机的喷油特性进行计算预测,进而可以开展工作过程计算,预测柴油机的燃烧特性和整机性能,为寻求变启喷压力喷油器的控制策略打下了基础。

参考文献

- [1] M. Badami et al. Influence of injection pressure on the performance of a DI diesel engine with a common rail fuel injection system[C]. SAE paper,1999-01-0193.
- [2] D. T. Hountalas, D. A. Kouremenos and G. C. Mavropoulos. Multi-zone combustion modeling as a tool for DI diesel engine development-application for the effect of injection pressure[C]. SAE paper,2004-01-0115.
- [3] 姚春德. 启喷压力对直喷式柴油机燃烧的影响[J]. 内燃机工程,1994(4):7-12.
- [4] 冒晓建,肖文雍,徐美玲等. 提高泵-管-嘴供油系统喷射压力的研究[J]. 内燃机工程,2001(3):28-31.
- [5] 関岡信明,庄保怡. 三菱 UEC52L 型柴油机特点和第一台整机实验结果[J]. 柴油机,1985(04):16-29.
- [6] 喷射控制系统的研究[J]. 内燃机工程,2009,30(2):61-64.
- [7] 张思庆. 240/275 型柴油机用电控泵-管-嘴系统[J]. 内燃机车,2002(10):6-10.
- [8] Graham Balfour, Pierre Dupraz, Mark Ramsbottom, etc. Diesel fuel injection control for optimum driveability [C]. SAE Paper, No. 2000-01-0265, 2000.
- [9] Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon. Flywheel energy and power storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007(11), 235-258.
- [10] Heinzmann GmbH & Co KG. Digital basic system for digital governor (CANopen Gateway) [R]. Germany; 2004.
- [11] Heinzmann GmbH & Co KG. Heinzmann digital electronic speed governors operating instructions (Hand Programmer) [R]. Germany; 2004.