

电控单体泵喷射特性关键影响因素研究^{*}

范立云¹ 田丙奇¹ 马修真¹ 宋恩哲¹ 李建秋²

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;
2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 通过数值模拟揭示了凸轮型线速度、柱塞直径、高压油管长度、高压油管内径等关键影响因素对喷射特性中的喷油压力、循环喷油量、喷油持续期和供油系数的影响规律。利用 AMESim 建模,对比实验数据验证了仿真模型的准确性。应用实验设计的方法,考虑交互作用,进行了相关性分析,得出各种因素和喷射特性参数之间的相关系数。结果表明各影响因素的单因子及交互作用因子均与喷射特性存在着相关性,且随着转速的变化而呈复杂的变化规律。

关键词: 电控单体泵 燃油喷射系统 喷射特性 相关性分析
中图分类号: TK421.4; TK421.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0014-07

Key Influence Factors Investigation on the Electronic Unit Pump Injection Characteristics

Fan Liyun¹ Tian Bingqi¹ Ma Xiuzhen¹ Song Enzhe¹ Li Jianqiu²

(1. Department of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

The simulation model electronic unit pump (EUP) was established in AMESim environment. The accuracy of the model was validated by comparing with the experiment results. By simulating, the influence of cam profile velocity, plunger diameter, length of high pressure fuel pipe, inner diameter of high pressure fuel pipe on injection pressure, cycle fuel injection quantity, fuel injection duration and coefficient of fuel feeding was revealed. By using the design of experiments (DOE) method, and taking the interaction into consideration, correlation between various factors and injection characteristic was analyzed. The correlation coefficient was obtained by analysis, the results show that not only the single factor but also the interaction factor of various influence parameters has correlation with the injection characteristic, and the correlation coefficient represents complex law with the speed variation.

Key words Electronic unit pump, Fuel injection system, Injection characteristics, Correlation analysis

引言

电控单体泵是应用于柴油机上,能够满足排放法规和改善燃油经济性的时间控制式燃油喷射系统^[1~5]。其喷油定时和喷油量都由电磁阀控制,系

统具有喷油定时柔性可调的优点。系统的喷射特性参数主要包括:喷油压力、循环喷油量、喷油持续期、供油系数(循环喷油量与每循环进入高压油管燃油量的比值),这4个参数是决定单体泵喷油系统喷射特性的关键因素^[6]。本文在 AMESim 环境下建

收稿日期: 2010-09-16 修回日期: 2010-11-08
^{*} 国家自然科学基金资助项目(5090024)、清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF10102)、广东省教育部产学研结合项目(2009A090100050)和中央高校基本科研业务费专项资金项目
作者简介: 范立云,副教授,博士,主要从事柴油机电控喷油研究,E-mail: fanly_01@163.com

立仿真模型,研究系统关键因素对喷射特性参数的影响规律,得出影响喷射特性的关键因素及其影响机理,为系统电磁、机械、液力方面的综合优化提供指导,从而保证系统能够在满足发动机特定工况循环喷油量的前提下,喷射压力、喷油持续期及系统的供油效率满足设计目标,最终使发动机满足对排放和经济性的要求。

1 系统组成和工作原理

电控单体泵的结构如图 1 所示。主要包括电磁阀控制部分和柱塞加压部分:电磁阀控制部分包括电磁铁、衔铁、控制阀杆、衔铁复位弹簧、出油堵头等零部件;柱塞加压部分包括柱塞、柱塞套和柱塞弹簧。电控单体泵通过电磁阀控制喷油,通电时,电磁铁吸合衔铁,拉动控制阀杆,关闭密封锥面,切断燃油回路,从而在泵腔内建立起燃油喷射所需的高压。该方式实现了对燃油喷射过程的数字控制,改变了传统喷油泵复杂的机械控制方式。对喷油量和喷油定时的控制通过调节控制阀杆的闭合时间和闭合时刻来实现。

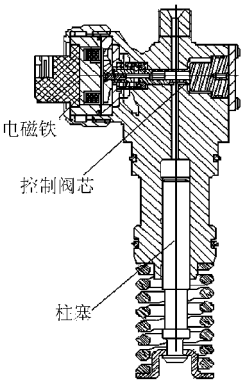


图 1 电控单体泵结构图
Fig. 1 Schematic of EUP

2 仿真模型

电控单体泵系统是集电场、磁场、机械运动和流场于一体的复杂系统,相互作用关系如图 2 所示,每个场通过各自的控制方程及相互作用的变量耦合在一起,通过油管内的波动方程,每个场的参数都会直接或间接地影响最终的喷射特性。单纯的实验研究难以实现对系统喷射特性的深入分析,需采用数值仿真的方法,以揭示影响喷射特性的本质规律。本文在 AMESim 环境中建立了数值模型,如图 3 所示。为验证模型的准确性,将计算值与实测值进行对比。图 4 是凸轮转速为 900 r/min,循环喷油量为 150 mm³时,在相同控制电流下,喷油规律的实验和仿真结果对比曲线。图 5 是在不同凸轮转速下,满

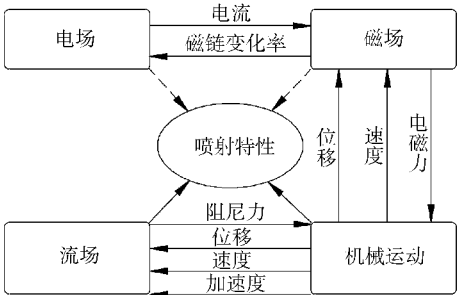


图 2 各种场的相互作用关系

Fig. 2 Relationship of different fields

足实验和仿真相同循环喷油量(某种机型外特性下循环喷油量)的前提下,泵端压力和嘴端压力的实验和仿真结果。可见仿真模型能够准确地预测泵端压力、嘴端压力和喷油规律,由图中可知系统在喷油过程中的燃油喷射持续期和喷油提前角是一致的,喷油时序也是一致的,而且在任何转速下泵端压力和嘴端压力都能得到很好地预测,最大偏差为 7%,因此该模型能够准确预测系统的喷射特性参数^[7]。

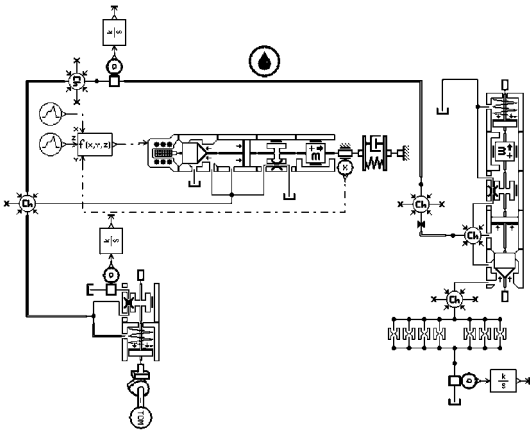


图 3 电控单体泵仿真模型

Fig. 3 AMESim simulation model of EUP

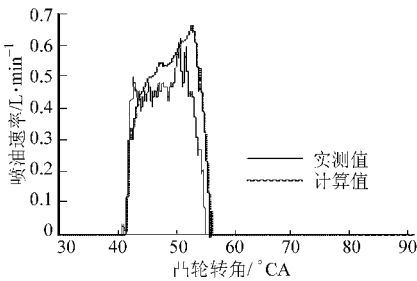


图 4 喷油规律实测值与计算值对比

Fig. 4 Comparison curves of measured and simulation fuel injection rates

3 喷射特性参数的响应分析

在满足发动机特定工况的循环喷油量前提下,喷射特性参数主要由系统的凸轮型线速度、柱塞直径、高压油管长度、高压油管内径和喷油器流量 5 个

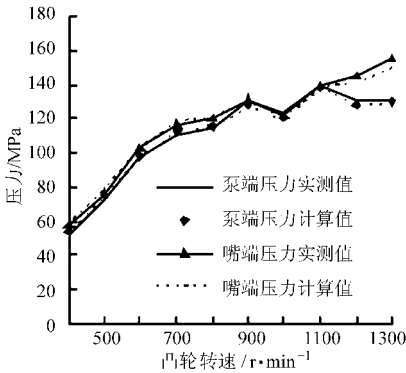


图5 不同转速的实测和计算压力对比

Fig.5 Comparison of measured and simulation pressure at different cam speeds

关键影响因素决定^[8]。所谓响应分析就是在满足工程要求范围内改变5个因素,研究喷射特性的响应规律。表1为5个因素的取值范围,研究其中一因素对喷射特性的响应分析时,其他因素取各自的中间值,本研究的初始状态为满足某机型外特性油量的条件下,通过改变因素取值来研究喷射特性的响应。电控单体泵对燃油喷射的电磁控制是基于时间的,在本文的仿真过程中,通过对电磁阀的动作时间长度和动作时刻进行控制,从而实现对燃油喷射过程的控制。本文中所作的分析和研究是针对较大负荷的工况来进行的,因此文中的仿真结果及分析结论亦是在此条件下得出并适用于此条件下的。

3.1 凸轮工作段型线速度

如图6a可知,喷射压力随着型线速度、凸轮转速的增加而增加。并且型线速度在高转速时对喷射压力的影响更加明显。不同型线速度时最大喷射压力差为34 MPa。如图6b所示,循环喷油量随着凸轮型线速度增加而增加,在凸轮转速1300 r/min时,不同型线速度的最大循环喷油量差约12 mm³之

多。低转速时相差的趋势更明显,在500 r/min 凸轮转速时最大循环喷油量差为17 mm³,原因是与高转速相比,低转速时的单位凸轮转角的绝对时间变长,型线速度在低速起作用的时间长,对循环喷油量影响更大。

表1 特性参数范围	
Tab.1 Reference value of characteristic parameters	
参数	数值
凸轮工作段型线速度/mm·(°CA) ⁻¹	0.31~0.37
柱塞直径/mm	9~11
高压油管长度/mm	170~770
高压油管内径/mm	1.6~2.0
喷雾器流量/mL	500~650(30 s,10 MPa)

如图6c,喷油持续期随凸轮型线速度的变化在高低转速变化规律不明显。这是由于喷油持续期由喷油脉宽决定,在喷油脉宽一定的条件下,凸轮型线速度只能通过改变高压油管的建立压力速度来影响喷油器开启延迟时间和关闭延迟时间,最大只有0.5°CA的变化。

如图6d,供油系数随凸轮型线速度的变化不明显,凸轮型线速度增加,供油系数下降,整个凸轮转速范围都在0.01~0.02内变化。供油系数随凸轮转速的增加而降低,从凸轮转速500 r/min的0.7左右到凸轮转速1300 r/min的0.5左右。由于喷射压力随着转速的增加而增加,喷射压力的增加使高压油管膨胀体积增加,供油效率降低;同理,同一凸轮转速时高凸轮型线速度喷射压力高,供油效率降低。另外,随着凸轮转速变化的喷射压力升高率比随着凸轮型线速度变化显著,所以,供油系数随着凸轮转速变化明显。

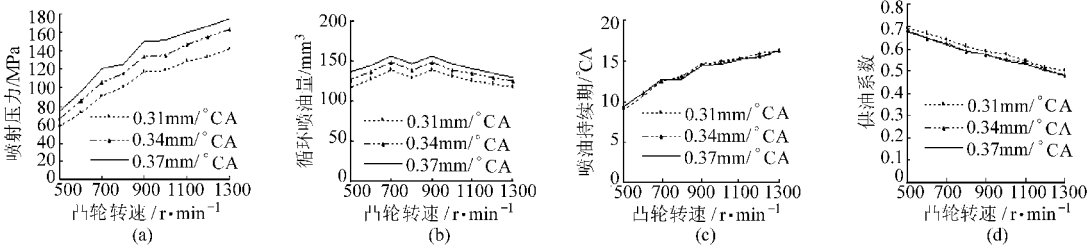


图6 凸轮型线速度对喷射特性的影响

Fig.6 Influence of cam profile velocity on injection

(a) 喷射压力 (b) 循环喷油量 (c) 喷油持续期 (d) 供油系数

3.2 柱塞直径

如图7a所示,喷射压力随着柱塞直径、凸轮转速的增加而增加。柱塞直径在高转速时对喷射压力的影响比凸轮型线速度影响明显。在凸轮转速1300 r/min时最大喷射压力差为68 MPa,在凸轮转

速500 r/min时最大喷射压力差约为27 MPa。

如图7b所示,循环喷油量随着柱塞直径增加而增加,这种趋势在低凸轮转速表现得更加明显,在凸轮转速500 r/min时,11 mm柱塞直径比9 mm柱塞直径的循环喷油量多40 mm³,这是由于柱塞直径增

加,单位时间内供油速率增加,进而喷射压力升高,循环喷油量增加。循环喷油量是喷射压力和喷油绝对时间的函数,尽管与高凸轮转速相比,低转速时喷射压力低,但低转速单位凸轮转角的绝对时间变长,导致相同柱塞面积差的条件下循环喷油量变化大。如图7b、7c,随着凸轮转速的增大,喷油持续期增加,但循环喷油量并未随喷油持续期的增加而相应增大。相反,在凸轮转速高于900 r/min 时,循环喷油量随喷油持续期的增加反而有下降趋势。可见,低转速时喷油绝对时间对循环喷油量起主导作用,高转速时喷射压力对循环喷油量起主导作用。

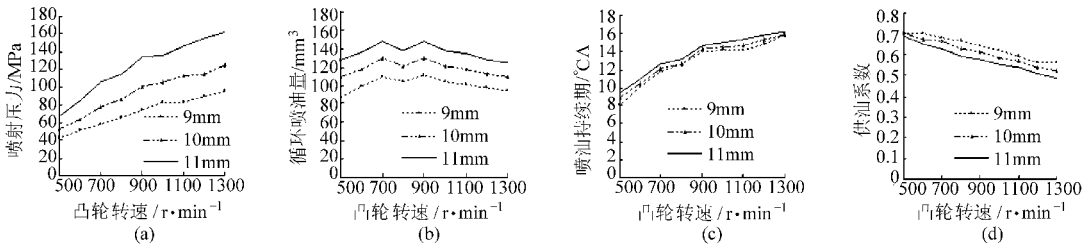


图7 柱塞直径对喷射特性的影响

Fig. 7 Influence of plunger diameter on injection

(a) 喷射压力 (b) 循环喷油量 (c) 喷油持续期 (d) 供油系数

3.3 高压油管长度

如图8a,喷射压力总体上随高压油管长度的增加而减小,但随转速变化的规律性并不强。在凸轮转速1300 r/min 附近,长770 mm 的高压油管比长470 mm 的高压油管对应的喷射压力反而高。此外,长470 mm 的高压油管从凸轮转速900 r/min 开始,随转速的增加,喷射压力增加的斜率明显变缓;而长170 mm 的高压油管从凸轮转速1200 r/min 开始,随着转速的增加,喷射压力反而出现降低的趋势。这是由于高压油管的长度对压力波传播时间的影响和高压容积对建压过程的影响二者综合作用的结果^[9]。

如图8b、8c,循环喷油量和喷油持续期随高压油管长度变化不明显。低转速时,循环喷油量随油管长度增加有减少的趋势,喷油持续期则表现出相反的规律;高转速时,循环喷油量随着油管长度的增

加有增加的趋势,而喷油持续期仍呈相反的规律。原因为在低转速时,与短高压油管相比,虽然长高压油管在峰值压力之后泄压时间和柱塞作用时间都比较长,泄油时间有所增加,但其增加的程度不及短油管喷射峰值压力高对喷油量的影响大。对于喷油持续期而言,在低转速时由于喷射压力低,高压油管长短对泄压时间的影响不显著,因此低速时短油管喷油持续期增加小;到了高转速由于喷射压力的增加,长油管的泄油时间增加显著,使得喷油持续期增加比短油管明显。

如图8d,高压油管长度对供油系数的影响显著。随凸轮转速的增加供油系数逐渐降低,凸轮转速500~1300 r/min 时变化在0~0.2 内;在相同转速下,供油系数随油管长度的变化也表现出基本一致的趋势,即随着高压油管长度增加而减少,其变化都在0.1~0.2 内,原因是高压油管长度的增加相当

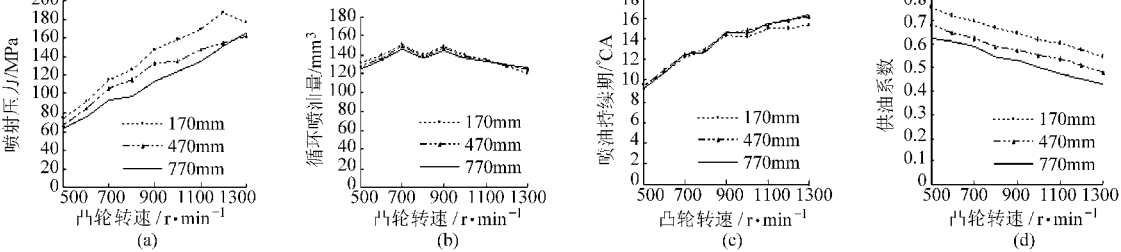


图8 高压油管长度对喷射特性的影响

Fig. 8 Influence of high pressure pipe length on injection

(a) 喷射压力 (b) 循环喷油量 (c) 喷油持续期 (d) 供油系数

于增加了高压容积,降低了供油效率。

3.4 高压油管内径

如图 9a,喷射压力随高压油管内径增加而减小,在高转速时影响显著,最大压力差为 31 MPa,这是由于油管内径的增加相当于高压容积的增加。与低转速相比,相同凸轮转角喷油脉宽下高转速喷射压力升高率大,喷油时间短,高压容积的增加对喷射压力影响显著;低转速时,由于喷射时间长,压力升高率小,喷射压力在一定程度上得到了弥补。

如图 9b,循环喷油量随油管内径增加而减少,

最大循环喷油量差为 7 mm³,原因是内径小的油管喷射压力高,进而喷油量大。

如图 9c,油管内径对喷油持续期在整个转速范围内没有影响,由于高压内径的变化对喷射压力开始建压影响小,进而对喷油器开启延迟影响小,长度不变对高压油管泄油时间影响小,因此对喷油器关闭时间影响小。

如图 9d,油管内径对供油系数的影响与油管长度相同,供油系数随着内径增加而减小,随着凸轮转速增加而减小。

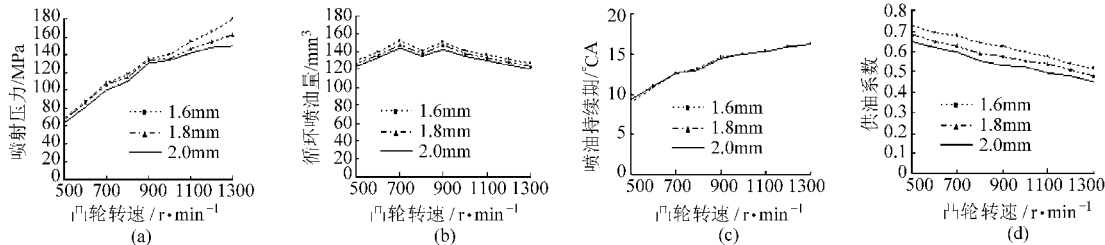


图9 高压油管内径对喷射特性的影响

Fig. 9 Influence of high pressure pipe inner diameter on injection

(a) 喷射压力 (b) 循环喷油量 (c) 喷油持续期 (d) 供油系数

3.5 喷油器流量

如图 10a,随着喷油器流量的增加,喷射压力降低,下降幅度在整个转速范围内基本相同,最大为 12 MPa,这是由于喷油器喷孔流通面积变化引起的。

如图 10b、10c,由于喷射压力随着喷油器流量增加而下降,因此循环喷油量表现出相同的变化规律;喷油持续期随着喷油器流量的变化不明显,整个

转速范围内基本没有变化。

如图 10d,供油系数随着喷油器流量增加而增加,并且随着转速增加而降低,同一转速随着喷油器流量的变化供油系数在 0.1 范围内变化,原因为喷油器流量增加导致循环喷油量增加的同时喷射压力降低,所以供油系数下降。

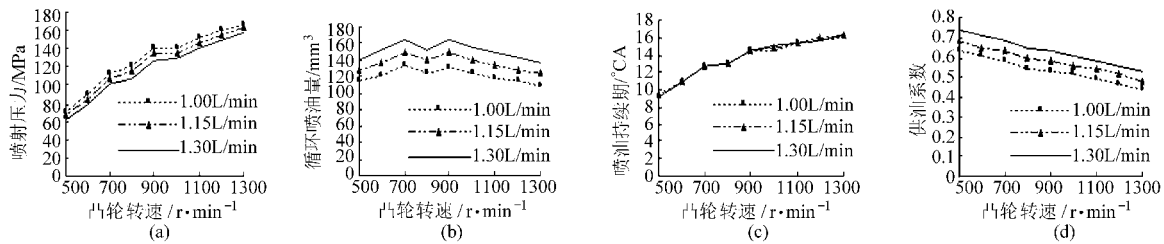


图10 喷油器流量对喷射特性的影响

Fig. 10 Influence of injector flow on injection

(a) 喷射压力 (b) 循环喷油量 (c) 喷油持续期 (d) 供油系数

4 喷射特性参数响应分析

采用实验设计的思想,通过面中央合成设计的响应面方法^[10],在 AMESim 计算模型中进行 29 组实验可以分析 5 个因素与喷射特性响应之间的相关性、因素之间的交互作用与喷射特性响应之间的相关性。

图 11、12 分别为凸轮转速 500 r/min、1 300 r/min 时 5 个关键因素在交互作用下的 20 个因子与喷射压力、循环喷油量、喷油持续期和供油系数的相关系数。由图 11a、12a 可知,柱塞直径与喷射压力的相关系数最大,随着转速的升高而升高;其次为凸轮型

线速度与喷射压力的相关系数,随着转速的升高而降低;高压油管直径、高压油管长度和喷油器流量与喷射压力有负相关性(负相关性表示影响参数增加,喷射压力降低),高压油管长度与喷射压力的相关性随着转速的升高而升高,高压油管直径以及喷油器流量与喷射压力的相关性随着转速升高变化规律不明显。各种因素与自身的交互作用因子与喷射压力有相关性,而且不同因素间的交互作用因子与喷射压力也有相关性,因素自身的交互作用因子6~10与喷射压力的相关性比较大,并且都是正相关的,随着转速升高相关性系数存在变化。因子6、9、

10 与因子 1 类似随着转速的升高而减小,由于因子 9 是柱塞直径(因子 4)的自身交互作用因子,因子 4 随着转速的升高而升高,而因子 9 随着转速的升高而降低,可见参数本身的一次项和二次项随着转速的变化发生复杂的变化规律。因子 11、12 和 18 随

着转速的变化与喷射压力的相关性也在发生变化,并且二次交互作用因子随着转速的变化与喷射压力的相关性都在发生变化,因此影响喷射特性中的喷射压力响应参数是在 20 个因子作用下随着转速的变化共同影响决定的。

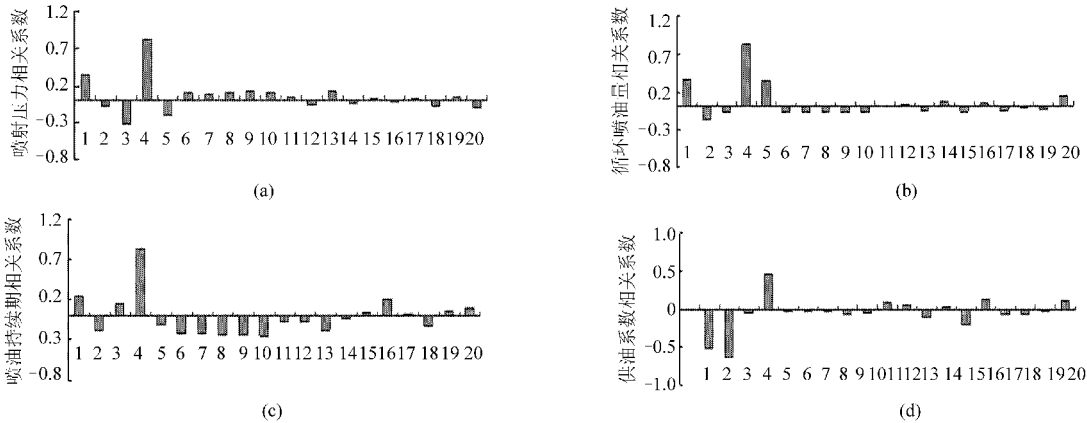


图 11 凸轮转速 500 r/min 考虑交互作用下的各种因子与喷射特性的相关性系数

Fig. 11 Correlation of different factors with injection at interaction condition when the cam rotate speed is 500 r/min

(a) 喷射压力相关系数 (b) 循环喷油量相关系数 (c) 喷油持续期相关系数 (d) 供油系数相关系数

1. 凸轮型线速度 2. 高压油管内径 3. 高压油管长度 4. 柱塞直径 5. 喷油器流量 6. 凸轮型线速度×凸轮型线速度 7. 高压油管内径×高压油管内径 8. 高压油管长度×高压油管长度 9. 柱塞直径×柱塞直径 10. 喷油器流量×喷油器流量 11. 凸轮型线速度×高压油管内径 12. 凸轮型线速度×高压油管长度 13. 凸轮型线速度×柱塞直径 14. 凸轮型线速度×喷油器流量 15. 高压油管内径×高压油管长度 16. 高压油管内径×柱塞直径 17. 高压油管内径×喷油器流量 18. 高压油管长度×柱塞直径 19. 高压油管长度×喷油器流量 20. 柱塞直径×喷油器流量

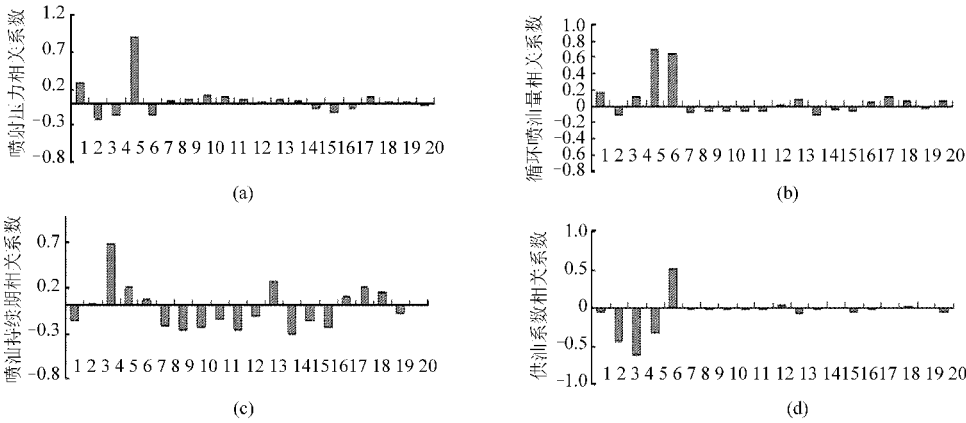


图 12 凸轮转速 1300 r/min 考虑交互作用下的各种因子与喷射特性的相关性系数

Fig. 12 Correlation of different factors with injection at interaction condition when the cam rotate speed is 1300 r/min

(a) 喷射压力相关系数 (b) 循环喷油量相关系数 (c) 喷油持续期相关系数 (d) 供油系数相关系数

1. 凸轮型线速度 2. 高压油管内径 3. 高压油管长度 4. 柱塞直径 5. 喷油器流量 6. 凸轮型线速度×凸轮型线速度 7. 高压油管内径×高压油管内径 8. 高压油管长度×高压油管长度 9. 柱塞直径×柱塞直径 10. 喷油器流量×喷油器流量 11. 凸轮型线速度×高压油管内径 12. 凸轮型线速度×高压油管长度 13. 凸轮型线速度×柱塞直径 14. 凸轮型线速度×喷油器流量 15. 高压油管内径×高压油管长度 16. 高压油管内径×柱塞直径 17. 高压油管内径×喷油器流量 18. 高压油管长度×柱塞直径 19. 高压油管长度×喷油器流量 20. 柱塞直径×喷油器流量

根据图 11b、12b 可知,柱塞直径与循环喷油量的相关系数最大,随着转速的升高而降低;其次为喷油器流量与循环喷油量的相关系数,随着转速的升高而降低;高压油管直径与循环喷油量之间为负相关,随着转速的升高相关性降低;凸轮型线速度与循环喷油量的相关性随着转速升高而降低;高压油管

长度在低速时有负相关系数,到了高转速相关系数为正。各种因素与自身的交互作用因子与循环喷油量有相关性,而且不同因素间的交互作用因子与循环喷油量也有相关性,因素自身交互作用因子 6 ~ 10 与循环喷油量的相关性全为负相关,随着转速的升高变化规律不明显。因子 12 ~ 18 随着转速的变

化与循环喷油量的相关性也在发生变化。可见,循环喷油量是由20个因子随着转速的变化共同复杂作用决定的。

由图11c、12c知,20个因子与喷油持续期相关系数随转速变化比较大,规律不明显,在500 r/min 凸轮转速下柱塞直径与喷射持续期的相关性最大,而1300 r/min 凸轮转速下高压油管长度与喷油持续期相关性最大;因子1、2、5随着转速变化的正负相关性发生变化,且相关性很小,而二次相互作用因子6~10与喷油持续期的相关性在整个转速范围内都比较大,且都为负相关;高、低转速相比,高转速1300 r/min 二次交互作用因子11~19影响比较显著,并且随着转速变化比较大,规律不明显;可见喷射特性中的喷油持续期响应参数是在20个因子作用下随着转速的变化共同影响决定的,通过一次作用因子1~5与二次作用因子相比,影响喷油持续期的因子中二次因子占主导作用,表现出随转速变化更加复杂的变化规律。

根据图11d、12d可知,20个因子与供油系数相关系数中一次作用因子1~5影响大,二次作用因子在低转速起作用显著,高转速1300 r/min 相关性不显著。因子1~4与供油系数的相关性为负,随着转速的变化规律不明显;因子5与供油系数的相关性大,并且为正相关性。20个因子随着转速的变化相关性发生复杂的变化。

总之,电控单体泵燃油喷射系统的喷射特性是由5个关键影响因子所组成的20个因子复杂交互作用,随着转速的变化而表现出复杂的规律。因此,电控单体泵燃油喷射系统是一个多输入、多输出、复杂的非线性系统。

5 结论

(1) 建立的AMESim数值模型能够准确地预测电控单体泵喷射特性参数。

(2) 喷射特性参数的响应分析揭示了凸轮型线速度、柱塞直径、高压油管长度、高压油管内径和喷油器流量等关键影响因素对喷射特性中的喷油压力、循环喷油量、喷油持续期和供油系数的影响规律。凸轮型线速度和柱塞直径对喷射压力影响显著;柱塞直径和喷油器流量对循环喷油量影响显著;柱塞直径对喷油持续期影响显著;高压油管长度、高压油管内径和喷油器流量对供油系数影响显著。

(3) 喷射特性参数的相关性分析揭示了喷射特性是由5个关键影响因素所组成的20个因子复杂交互作用,不但各影响因素的单因子和喷射特性有相关性,交互作用因子和喷射特性也有相关性,并且随着转速的变化而表现出复杂的变化规律。电控单体泵燃油喷射系统是一个多输入、多输出、复杂的非线性系统。

参 考 文 献

- 1 Yang Minggao, Sorenson S C. Modeling of the dynamic processes in an electronic diesel fuel injection system [C]. SAE Paper 9202400, 1992.
- 2 Arcoumanis C, Gavaises M, Abdui-Wahab E, et al. Modeling of advanced high pressure fuel injection systems for passenger car diesel engines [C]. SAE Paper 1999-01-0910, 1999.
- 3 Cantore G, Mattarelli E, Boretti A. Experimental and theoretical analysis of a diesel fuel injection system [C]. SAE Paper 1999-01-0199, 1999.
- 4 Catania A E, Dongiovanni C, Spessa E. Delivery valve effects on the performance of an automotive diesel fuel injection system [C]. SAE Paper 1999-01-0914, 1999.
- 5 Greeves G, Tullis S, Barker B. Advanced two-actuator EUI and emission reduction for heavy-duty diesel engines [C]. SAE Paper 2003-01-0698, 2003.
- 6 Aditya Mulemane, Joong-Sub Han, Pai-Hsiu Lu, et al. Modeling dynamic behavior of diesel fuel injection systems [C]. SAE Paper 2004-01-0536, 2004.
- 7 Fan L Y, Long W Q, Zhu Y X, et al. A characteristic study of electronic in-line pump system for diesel engines [C]. SAE Paper 2008-01-0943, 2008.
- 8 Fan L Y, Ma X Z, Tian B Q, et al. Quantitative analysis on cycle fuel injection quantity fluctuation of diesel engine electronic in-line pump system [C]. SAE Paper 2010-01-0875, 2010.
- 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的影响试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 22~24.
Qiu Tao, Yin Wenhui, Liu Xinghua, 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): 22~24. (in Chinese)
- 10 Umetrics A B. MODDE 7.0: Users guide and tutorial[S]. 2003.