

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.001

# 电控单体泵全工况循环喷油量影响参数相关性分析\*

田丙奇<sup>1</sup> 范立云<sup>1</sup> 马修真<sup>1</sup> 宋恩哲<sup>1</sup> 李建秋<sup>2</sup>

(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】** 电控单体泵的循环喷油量波动影响喷油系统工作的稳定性和一致性。利用 AMESim 软件建立单体泵数值模型,应用实验设计思想,制定了相关性分析的仿真方法。通过仿真和相关性分析,揭示了全工况平面内关键影响参数分别在有无交互作用下与循环喷油量的相关性变化规律,表现出复杂的非线性。得出无参数交互作用下全工况平面内与循环喷油量有显著相关性的特性参数为低压供油压力、凸轮型线速率、控制阀杆升程、喷油器开启压力、喷油器针阀升程和喷油器流量系数;交互作用下参数自身交互作用的二次因子与循环喷油量的相关性最显著。

**关键词:** 电控单体泵 全工况 循环喷油量 相关性分析

**中图分类号:** TK421+.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0001-10

## Influence Factors Correlation Analysis on the Electronic Unit Pump Fuel Injection Quantity in Overall Operating Conditions

Tian Bingqi<sup>1</sup> Fan Liyun<sup>1</sup> Ma Xiuzhen<sup>1</sup> Song Enzhe<sup>1</sup> Li Jianqiu<sup>2</sup>

(1. College 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

Cycle fuel injection quantity fluctuation of electronic unit pump (EUP) determines the coherence and stability of the EUP fuel injection system. The simulation model of EUP was established in the AMESim environment, and the method of simulation experiment was designed by using the design of experiments (DOE) method. The result obtained by the simulation revealed the variation law of correlation under parameters interaction or not respectively in the overall operating conditions. The result shows that the EUP system is a complex nonlinear system. In the overall operating conditions the characteristic parameters such as fuel supply pressure, cam profile velocity, control valve lift, injector opening pressure, and injector needle lift as well as the injector flow coefficient have remarkable correlation with the cycle fuel injection quantity when there is no interaction between parameters. The second order factors under self interaction of parameters are the most remarkable second order factors when the interaction between parameters is considered.

**Key words** EUP, Overall operating conditions, Cycle fuel injection quantity, Correlation analysis

### 引言

电控单体泵通过对喷油过程的数字化控制,能有效提高喷油压力,改善发动机的经济性、降低有害

排放<sup>[1-4]</sup>。电控单体泵脉动供油的特性和系统中各特性参数及参数间交互作用的影响,导致其循环喷油量存在波动现象,影响发动机工作的稳定性和一致性<sup>[5-7]</sup>。因此,在全工况平面对特性参数及参数

收稿日期: 2011-05-25 修回日期: 2011-06-28

\* 国家自然科学基金资助项目(50909024)、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资助项目

作者简介: 田丙奇, 博士生, 主要从事柴油机电控喷油技术研究, E-mail: tianbingqi\_hrbeu@163.com

之间交互作用与循环喷油量的相关性进行研究,得出相关系数的变化规律,揭示影响循环喷油量的关键参数或参数间交互作用下的主要影响因子,对优化喷油系统特性参数,解耦参数间交互作用,提高电控单体泵喷油系统的稳定性有重要意义,可为电控单体泵全工况平面循环喷油量的稳定设计提供理论指导。

## 1 系统结构及原理

本文所研究的电控单体泵喷油系统最大循环喷油量为  $240 \text{ mm}^3$ ,最大喷油压力可超过  $150 \text{ MPa}$ ,最高额定转速可达  $2800 \text{ r/min}$ ,使用转子式输油泵进行供油,供油柱塞直径为  $11 \text{ mm}$ 。在油泵实验台架上利用该单体泵进行了相应的实验,并利用测取的实验数据对仿真模型进行了验证。电控单体泵的结构如图1所示,主要由电磁控制部分和柱塞加压部分组成<sup>[8-10]</sup>。

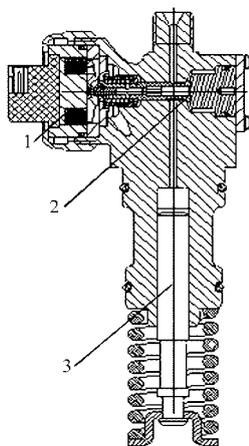


图1 电控单体泵结构原理图

Fig. 1 Schematic of EUP

1. 电磁铁 2. 控制阀杆 3. 柱塞

电磁控制部分包括电磁铁、衔铁、控制阀杆、衔铁复位弹簧和出油堵头;柱塞加压部分包括柱塞、柱塞套和柱塞弹簧。电控单体泵由电磁阀控制喷油,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,从而在泵腔内建立燃油喷射所需的高压。通过调节控制阀杆的闭合持续时间和闭合时刻实现对喷油量和喷油定时的控制。

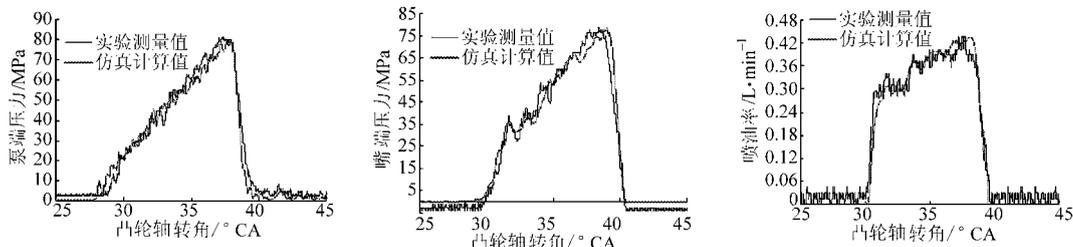


图3  $500 \text{ r/min}$ ,  $8^\circ \text{CA}$  工况点对比曲线

Fig. 3 Comparison curves at  $500 \text{ r/min}$  and  $8^\circ \text{CA}$  operating condition

## 2 仿真模型与实验方法

对电控单体泵喷油系统进行相关性研究需将多个特性参数作为影响因素,因此在全工况平面内研究参数间交互作用需做大量实验(如,全工况平面9个工况点7个影响因素的三水平交互作用研究需做  $3^7 \times 9 = 19683$  次实验),且系统内集中了多个物理场的复杂作用,仅靠实验研究不仅需要巨大的工作量,而且难以实现对系统性能的深入分析,因此需采用数值仿真的方法。本文在 AMESim 环境中建立了电控单体泵喷油系统的仿真模型,如图2所示。

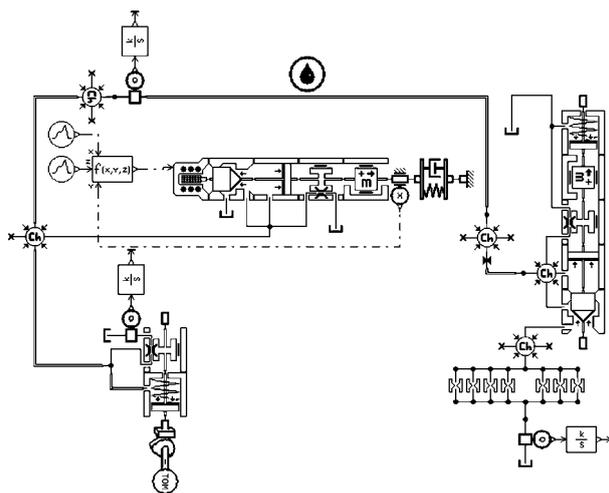


图2 电控单体泵仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of EUP

通过与实验测量结果对比,验证了仿真模型的准确性。图3~5分别为喷油提前角为  $27^\circ \text{CA}$  时,凸轮轴转速  $500 \text{ r/min}$ 、喷油脉宽  $8^\circ \text{CA}$ ,凸轮转速  $900 \text{ r/min}$ 、喷油脉宽  $10^\circ \text{CA}$ ,凸轮转速  $1300 \text{ r/min}$ 、喷油脉宽  $12^\circ \text{CA}$  时泵端压力、嘴端压力和喷油率的仿真计算与实验测量结果对比曲线。可见,在全工况平面范围内,模型的泵端、嘴端压力和喷油率在数值和时序上均具有较高的准确度,能够满足对电控单体泵喷油系统进行定性和定量分析的要求。

应用实验设计思想,采取面中央合成设计的响应面方法,将各特性参数作为影响因素,循环喷油量作为响应,制定仿真实验方法,按该方法对9个工况点7个影响因素的三水平交互作用进行研究仅需531

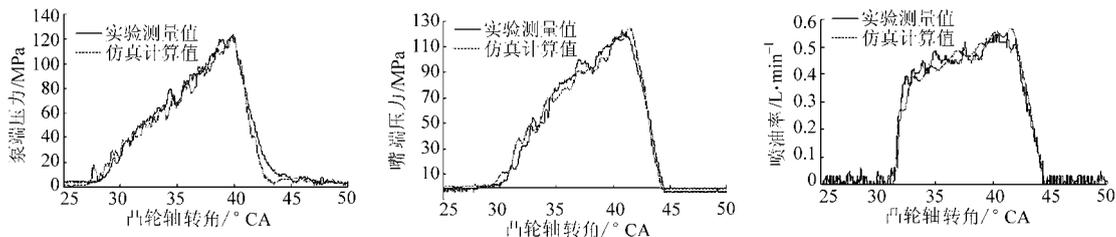


图 4 900 r/min, 10°CA 工况点对比曲线

Fig. 4 Comparison curves at 900 r/min and 10°CA operating condition

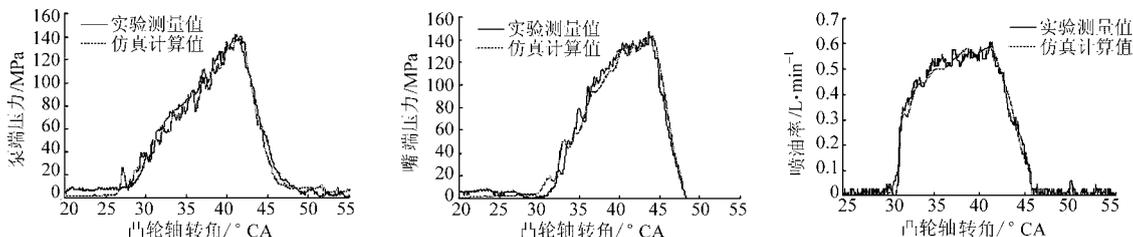


图 5 1300 r/min, 12°CA 工况点对比曲线

Fig. 5 Comparison curves at 1300 r/min and 12°CA operating condition

次实验。利用电控单体泵喷油系统仿真模型进行仿真实验,根据仿真结果,分析响应(循环喷油量)随着影响因素(特性参数)的变化规律,得到各参数与循环喷油量的相关系数,进而研究全工况平面内有无交互作用下各参数的一次、二次因子与循环喷油量的相关性变化规律。

### 3 特性参数及实验工况点

电控单体泵系统集电场、磁场、流场和机械运动于一体,通过运动方程和相互作用的参数耦合在一起,各物理场之间相互作用关系如图 6 所示<sup>[11-12]</sup>。

循环喷油量受系统各特性参数及参数间交互作用影响,并会随着使用期间各部件参数因磨损、机械冲击及热变形等原因引起的变化而产生波动。

本文选取的对循环喷油量有影响特性参数为:低压供油压力、凸轮型线速率、柱塞配合间隙、控制阀杆升程、衔铁残余气隙、控制阀杆配合间隙、喷油器开启压力、喷油器针阀升程和喷油器流量系数。

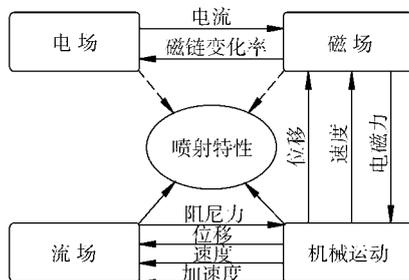


图 6 各种场的相互作用关系

Fig. 6 Schematic of relationship between different fields

为得到各参数的变化范围,对同一批次生产的 50 个样本进行检测,得到产品各参数在生产过程中因加工和装配造成的差别,然后从该批样本中随机选取 8 个样本进行 1 000 h 可靠性实验,对实验后的 8 个样本进行检测,得到使用期间内因磨损、机械冲击、热变形等原因引起的参数变化情况,最后根据所有测量结果,确定各参数的变化范围,各参数的基准值及变化范围如表 1 所示。

表 1 特性参数基准值及相对变化量

Tab.1 Reference value and variations of characteristic parameters

特性参数	低压供油压力/MPa	凸轮型线速率/(mm·°CA) <sup>-1</sup>	柱塞配合间隙/μm	控制阀杆升程/mm	衔铁残余气隙/mm	控制阀杆配合间隙/μm	喷油器开启压力/MPa	喷油器针阀升程/mm	喷油器流量系数
最小值	0.2	0.31	5	0.14	0.09	2	22	0.25	0.7
基准值	0.3	0.34	10	0.15	0.10	7	27	0.35	0.8
最大值	0.4	0.37	15	0.16	0.11	12	32	0.45	0.9

在油泵实验台架上对所研究的电控单体泵进行实验时,测取了基准参数时不同转速和喷油脉宽下的循环喷油量,如图 7 所示。

在全工况平面对电控单体泵喷油系统进行实验和仿真研究,要求选取的实验工况点能够全面准确地反映系统的喷射特性。根据单体泵系统所匹配柴

油机工作特点,选取能够反映系统喷射特性的低速(500 r/min)、中速(900 r/min)、高速(1300 r/min)3条负荷特性线和小喷油脉宽(2°CA)、中等喷油脉宽(8°CA)、大喷油脉宽(14°CA)3条速度特性线,通过对6条特性线上的循环喷油量波动情况进行深入分析,研究电控单体泵喷油系统在全工况平面内循

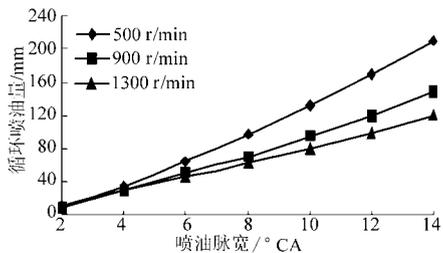


图7 基准参数下的循环喷油量变化曲线

Fig.7 Curves of cycle fuel injection quantity variation with reference value

环喷油量的波动特性。根据选取的6条特性线,全工况平面可离散为图8所示的6条特性线,即低速、中速、高速负荷特性线I、II、III,以及小脉宽、中等脉宽、大脉宽速度特性线IV、V、VI。负荷特性线上每 $2^{\circ}\text{CA}$ 喷油脉宽选取一个实验工况点,速度特性线上每100 r/min 凸轮转速选取一个实验工况点。

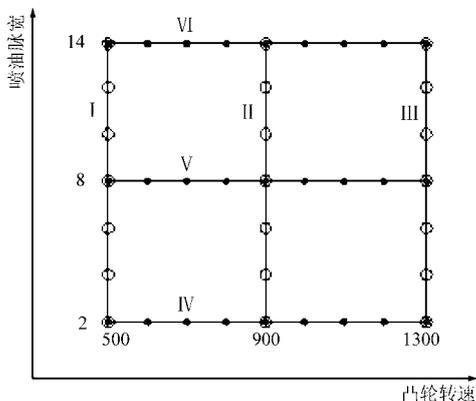


图8 全工况平面示意图

Fig.8 Schematic of overall operating conditions

## 4 循环喷油量的相关性分析

相关性分析是通过计算相关系数定量考察两个变量之间线性关系的一种分析方法,相关性分析从两方面来考察两变量间的线性关系,即相关的强度和相关的方向。

设两变量有如下两组观测值: $X:x_1, x_2, \dots, x_n$ ;  $Y:y_1, y_2, \dots, y_n$ 。则

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$r$ 为变量 $X$ 与 $Y$ 的相关系数。 $r$ 的取值范围为 $-1 \leq r \leq 1$ 。相关系数的绝对值(即 $|r|$ )表示两变量之间的线性相关强度。相关系数 $r$ 的正负表示相关的方向: $r$ 为正数,表示两变量间为正相关; $r$ 为负数,表示两变量间为负相关。利用仿真模型计算得到各工况点处各参数三水平变化所引起的循环喷油量变化值,对仿真结果进行相关性分析,从而得到各

特性参数及参数间交互作用与循环喷油量的相关系数。

### 4.1 无交互作用下循环喷油量的相关性分析

首先对无参数交互作用下各参数一次因子与循环喷油量的相关性进行分析。

图9为无交互作用下各特性参数与循环喷油量相关系数在全工况平面内6条特性线上9个工况点处的变化规律,图中的负相关性表示循环喷油量随着相应影响参数的增大而减小。图中特性参数序号1表示低压供油压力,2表示凸轮型线速率,3表示柱塞配合间隙,4表示控制阀杆升程,5表示衔铁残余气隙,6表示控制阀杆配合间隙,7表示喷油器开启压力,8表示喷油器针阀升程,9表示喷油器流量系数。由图中可见,各特性参数均与循环喷油量存在着一定程度的相关性,并呈现出复杂的变化规律,某些参数与循环喷油量的相关性甚至存在着正负方向的变化。

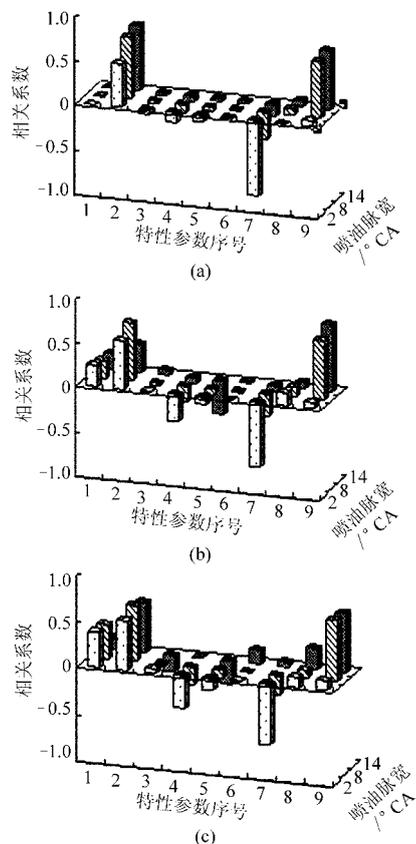


图9 无交互作用下特性参数与循环喷油量的相关系数

Fig.9 Correlation of factors with cycle fuel injection quantity under no interaction condition

(a) 500 r/min (b) 900 r/min (c) 1300 r/min

#### 4.1.1 低压供油压力

如图10所示,全工况平面内,低压供油压力与循环喷油量正相关。在低转速下,相关系数为零,即低压供油压力在低转速时对循环喷油量没有影响。

在中、小喷油脉宽下,相关系数随着转速增加而增大,在高速小喷油脉宽时,相关系数最大,为0.37。在大喷油脉宽下,相关系数随转速增大表现出先增大后减小的变化趋势。这是由于低压供油压力决定喷油系统能否充分吸油,低转速时,有效吸油时间长,吸油充分,对循环喷油量没有影响,但随着转速增加,有效吸油时间缩短,对循环喷油量的影响增大,相关系数增大。在高速小脉宽下,因有效吸油时间最短,系统吸油的充分程度最差,对循环喷油量的影响最大,相关系数达到最大。但在高速大喷油脉宽下,因喷油压力高,喷油时间长,能在一定程度上补偿由于吸油不充分而减少的喷油量,所以相关系数呈现先增大后减小的变化趋势。

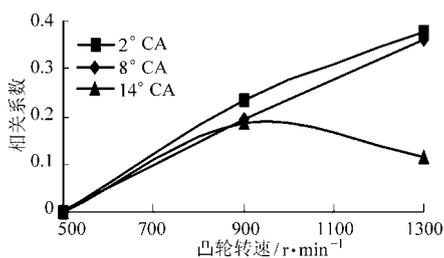


图10 低压供油压力与循环喷油量的相关系数

Fig. 10 Correlation of fuel supply pressure with cycle fuel injection quantity

#### 4.1.2 凸轮型线速率

凸轮型线速率决定柱塞的供油速率,其对循环喷油量的影响取决于其在喷油过程中的有效作用时间。如图11所示,在全工况平面内,凸轮型线速率与循环喷油量正相关,相关系数随凸轮转速升高而减小,随喷油脉宽增加而增大,且相关系数的变化趋势与凸轮转速及喷油脉宽呈良好的线性关系。在低速大喷油脉宽工况点相关系数最大,为0.73。

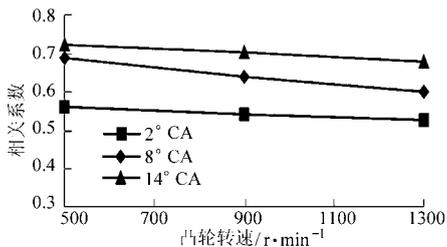


图11 凸轮型线速率与循环喷油量的相关系数

Fig. 11 Correlation of cam profile velocity with cycle fuel injection quantity

#### 4.1.3 柱塞配合间隙

如图12所示,柱塞配合间隙反映了供油过程中柱塞腔内燃油的泄漏程度,因此在全工况平面内柱塞配合间隙与循环喷油量主要表现为负相关,除高速大喷油脉宽下相关系数为-0.17外,在其它工况点处相关系数绝对值均小于0.05。这是由于柱塞

与柱塞套为单体泵中一对精密偶件,两者间的间隙变化很小,在全工况平面内对循环喷油量无明显影响,因此相关系数小,仅在高速大喷油脉宽下,因柱塞腔内燃油压力高,泄漏时间长,对循环喷油量的影响有一定程度的增加。

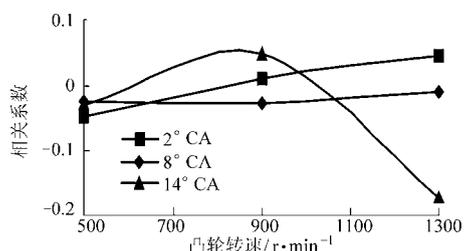


图12 柱塞配合间隙与循环喷油量的相关系数

Fig. 12 Correlation of plunger matching clearance with cycle fuel injection quantity

#### 4.1.4 控制阀杆升程

如图13所示,在中小喷油脉宽下,控制阀杆升程与循环喷油量的相关系数为负值,且绝对值随转速增加而增大,小脉宽时相关系数的绝对值较大,变化率也较大。在大脉宽的中低转速下,相关系数为负值,且其绝对值随着转速增加而增大,在高转速下,相关系数变为正值,但其数值较小。相关系数绝对值的最大值出现在高速小脉宽工况点,为0.34。

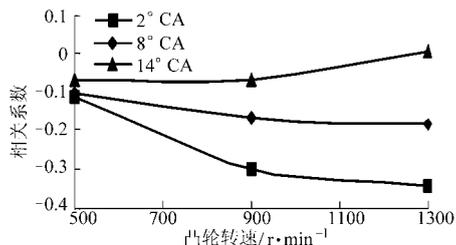


图13 控制阀杆升程与循环喷油量的相关系数

Fig. 13 Correlation of control valve lift with cycle fuel injection quantity

控制阀杆升程影响着控制阀杆在关闭和开启过程中的运动时间,影响柱塞建压过程中经由密封锥面的高压燃油泄漏量,进而影响泵腔内燃油压力的建立和释放速度。在中小喷油脉宽的全转速范围内和大喷油脉宽的中低转速下,控制阀杆升程增大使控制阀杆在关闭过程中的运动时间增长,因此在柱塞建压过程中经由密封锥面的高压燃油泄漏时间增长,泄漏量增加,导致泵腔内燃油压力的建立速度变缓,压力上升速度慢,从而使得循环喷油量减小。而柱塞供油时间随转速增加而缩短,使得控制阀杆升程的变化对循环喷油量的影响随着转速增加而增大,因此相关系数为负值且其绝对值随着转速的增加而增大。

但在大喷油脉宽高转速工况点,一方面控制阀杆升程的增大使柱塞建压过程中密封锥面处的燃油

泄漏增加,导致循环喷油量下降;另一方面由于转速高喷油时间长,柱塞的压缩时间也长,泵腔内燃油压力上升幅度大,喷油结束前泵腔内燃油压力远大于柱塞建压初期的燃油压力,虽然控制阀杆在复位开启时的运动时间较关闭时短,但是由于此时压力较高,在控制阀杆复位开启的运动过程中,喷油器仍能以较高压力继续喷油,不但补偿了因控制阀杆升程增大而造成的循环喷油量下降,甚至会使得循环喷油量增加,所以在此工况点处相关系数变为正值,但其数值较小。

#### 4.1.5 衔铁残余气隙

衔铁残余气隙决定作用在控制阀杆上的电磁力大小,与控制阀杆升程一同决定控制阀杆在启闭过程的运动时间,从而影响泵腔内油压的建立和释放速度,因此衔铁残余气隙与循环喷油量负相关。

如图14所示,在中、小喷油脉宽下,相关性较小,相关系数的绝对值小于0.13。但在大喷油脉宽时,表现出明显的相关性,在中等转速的大喷油脉宽工况点,相关性最大,为-0.37。大喷油脉宽下相关性的线性程度差,这是喷油系统非线性的一种表现,产生该现象的原因是大喷油脉宽的中高转速下燃油压力较高,电磁控制部分尤其是控制阀杆处的燃油处于不稳定的临界流动状态。

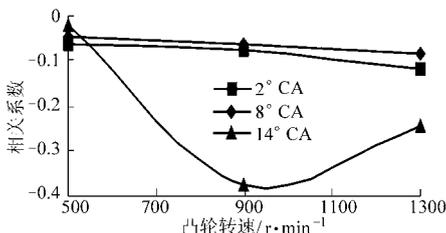


图14 衔铁残余气隙与循环喷油量的相关系数

Fig. 14 Correlation of anchor residual clearance with cycle fuel injection quantity

#### 4.1.6 控制阀杆配合间隙

控制阀杆配合间隙决定高压燃油在控制阀杆处的泄漏程度,由于控制阀杆与泵体也是单体泵一对精密配合偶件,因此如图15所示,在除大喷油脉宽下的中高转速工况点,在全工况平面内控制阀杆配合间隙与循环喷油量之间主要为负相关,且相关系数的绝对值小于0.025。在大喷油脉宽下的中高转速工况点,相关系数变为正值,这也是喷油系统非线性的一种表现,此处正负相关性的转变与燃油处于不稳定的临界流动状态、泵腔内燃油压力波反射及控制阀杆与阀套间的液力阻尼变化有关,可通过提高控制阀杆配合偶件的加工精度,在保证不出现卡滞的前提下,减小配合间隙来降低非线性。

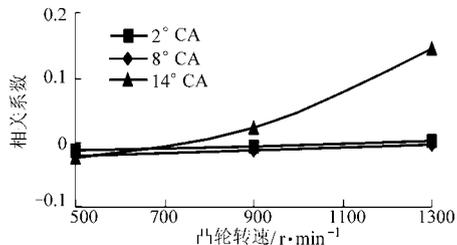


图15 控制阀杆配合间隙与循环喷油量的相关系数

Fig. 15 Correlation of control valve matching clearance with cycle fuel injection quantity

#### 4.1.7 喷油器开启压力

如图16,喷油器开启压力与循环喷油量的相关性主要为负相关,仅在高转速大喷油脉宽工况点为正相关。相同喷油脉宽下,相关系数的绝对值随凸轮转速的升高而近似线性减小,变化幅度不大,相同凸轮转速下,相关系数的绝对值随喷油脉宽的增大也呈近似线性减小趋势,变化幅度较大,在低速小脉宽工况点,相关系数的绝对值最大为0.84。

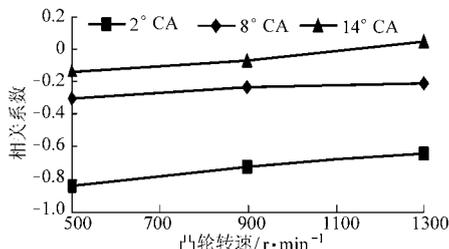


图16 喷油器开启压力与循环喷油量的相关系数

Fig. 16 Correlation of injector open pressure with cycle fuel injection quantity

喷油器开启压力决定燃油喷射的延迟期,随着喷油脉宽的增加,喷油延迟期所占有效喷油时间的比例减少;而随着凸轮转速的上升,喷嘴腔内的压力建立速率快,燃油压力高,针阀开启速度加快,缩短了喷油延迟期,因此相关系数为负且随喷油脉宽和凸轮转速升高而减少。而在高转速大喷油脉宽工况点,增大喷油器开启压力,一方面会延长喷油延迟期,使得循环喷油量降低,另一方面,较大的喷油器开启压力会相应提高燃油的初始喷射压力,这不仅能够补偿因喷油延迟期增长而降低的循环喷油量,而且会使循环喷油量有一定程度的增加,所以该工况点处的相关性为正相关。

#### 4.1.8 喷油器针阀升程

全工况平面内,喷油器针阀升程与循环喷油量主要为正相关,仅在低速小脉宽工况点为负相关。

如图17,在中、小喷油脉宽下,相关系数随凸轮转速的升高呈先增大后减小的趋势,在900 r/min的中等转速下,相关系数最大。大喷油脉宽下相关系数的变化趋势与中、小喷油脉宽下的变化相反,随着凸轮转速的升高,表现出先减小后增大的趋势,在高

速大喷油脉宽工况点,相关系数最大。

喷油器针阀升程决定针阀在开启和关闭过程中的运动时间,在中、小喷油脉宽下,有效喷油时间的变化是影响循环喷油量的主导因素,随着凸轮转速的升高,燃油压力升高,高压下针阀的运动速度加快,缩短了针阀运动时间,同时,凸轮转速的升高也缩短了有效喷油时间。当凸轮转速低于 900 r/min 时,燃油压力上升较慢,随着转速升高,喷油时间减少更为明显,从而增大了针阀升程对循环喷油量的影响,相关系数增大;而在凸轮转速高于 900 r/min 的工况下,随着凸轮转速的升高,燃油压力上升较快,针阀关闭时间的缩短程度更为明显,针阀运动时间所占喷油时间的比例减小,对循环喷油量的影响作用减小,相关系数出现减小的趋势。在低转速小喷油脉宽工况点,由于燃油压力建立缓慢,针阀开启速度慢,在针阀运动过程中,对燃油的节流作用较大,从而导致随针阀升程增大而出现循环喷油量微弱减小的现象,所以此处相关系数为负值,但数值很小,仅为  $-0.005$ 。

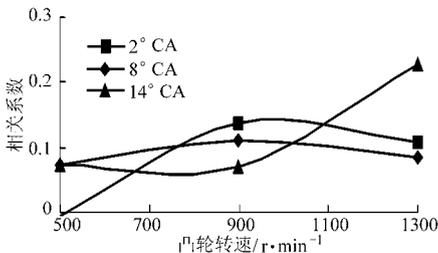


图 17 喷油器针阀升程与循环喷油量的相关系数

Fig. 17 Correlation of injector needle lift with cycle fuel injection quantity

在大喷油脉宽条件下,有效喷油时间长,当凸轮转速低于 900 r/min 时,针阀的运动时间对有效喷油时间的影响小,喷油器针阀升程与循环喷油量的相关性较小并且几乎没有变化,但当凸轮转速高于 900 r/min 后,随着凸轮转速的升高,喷油压力增大,一方面缩短了喷油时间,使得针阀的运动时间对有效喷油时间的影响增大,另一方面,较高的喷油压力使得针阀运动过程中的节流作用降低,增加了在针阀运动过程中的喷油量,因此喷油器针阀升程与循环喷油量的相关性增大,并在高速大喷油脉宽工况点处达到最大值,为 0.23。

#### 4.1.9 喷油器流量系数

如图 18,在全工况平面内,喷油器流量系数与循环喷油量正相关,小喷油脉宽时相关性不明显,不同转速下的相关系数均小于 0.1,且随着转速的升高而增大;在大、中喷油脉宽下,表现出明显的相关性,相关系数均在 0.5 以上,随着转速的升高呈现先增大后减小的趋势,最大值出现在中速大脉宽工况

点,为 0.75。

因为流量系数是喷孔通流特性的表征,相同条件下,流量系数大,流经喷孔的喷油量大。而流经喷孔的循环喷油量是时间和压力的函数,所以随喷油脉宽的增加,有效喷油时间增长,随着凸轮转速的升高,燃油喷射压力提高,均会使循环喷油量增加,所以相关系数为正,且呈现上述变化规律。但是在大、中喷油脉宽的中高转速工况点处,由于转速高,喷油压力高,喷孔两侧较大的压力差成为循环喷油量增大的主导因素,喷油器流量系数的影响相应有所减小,因此,相关系数出现减小趋势,并且随着喷油脉宽的增加,减小的趋势也更加明显。

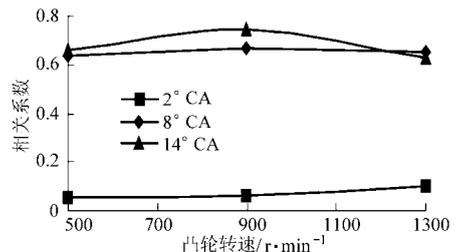


图 18 喷油器流量系数与循环喷油量的相关系数

Fig. 18 Correlation of injector flow coefficient with cycle fuel injection quantity

综上所述,全工况平面内与循环喷油量有显著相关性的参数有低压供油压力、凸轮型线速率、控制阀杆升程、喷油器开启压力、喷油器针阀升程和喷油器流量系数。电控单体泵脉动供油的固有特性使凸轮型线速率成为影响其循环喷油量的主要因素之一,在全工况平面内相关性均较显著。通过提高凸轮加工精度,提高联轴器精度,增加稳压容腔等方法,可减少因凸轮型线速率变化对循环喷油量的影响。在大、中喷油脉宽下,喷油器流量系数是循环喷油量最主要的影响参数,因此须严格控制喷孔的生产工艺和加工精度,避免因喷孔流量系数不一致或使用过程中发生变化而降低喷油系统的一致性,引起循环喷油量波动。设计新型凸轮型线,加快喷油时燃油压力的升高率,可以缩短喷油延迟期,从而减少喷油器开启压力和喷油器针阀升程对有效喷油时间的影响,减少循环喷油量波动。控制阀杆与衔铁装配为一体,随衔铁一同运动,通过对衔铁或控制阀杆的位移进行实时反馈,可以大幅减小控制阀杆升程对循环喷油量的影响。低压供油压力的波动取决于低压供油系统的稳定性,提高供油压力和回油阀性能的稳定性能可消除低压供油压力变化引起的循环喷油量波动。

#### 4.2 交互作用下循环喷油量的相关性分析

无交互作用下循环喷油量的相关性分析得出了各参数的一次因子与循环喷油量的相关系数在全工

况范围内的变化规律。为进一步研究喷油过程中各参数间交互作用因子对循环喷油量的影响,本节中除去与循环喷油量相关系数较小的柱塞配合间隙和控制阀杆配合间隙两参数,对参数交互作用下循环喷油量的波动进行相关性分析。系统各参数间的交互作用随着影响参数的增加而增加,存在着二阶、三阶、四阶甚至更高阶的交互作用,且交互作用服从排列组合规律。实际经验表明,多数交互作用是不存在的或者很小,以致可以忽略不计,因此在实际分析研究中主要考虑部分二阶交互作用<sup>[13]</sup>。图 19 是选定的 7 个特性参数二阶交互作用下的全部 28 个二次因子在全工况平面内 6 条特性线上的 9 个实验工况点处与循环喷油量的相关性分析结果。其中二次因子中 1 为控制阀杆升程自身交互作用的二次因子,2 为衔铁残余气隙自身交互作用的二次因子,3 为喷油器针阀升程自身交互作用的二次因子,4 为喷油器开启压力自身交互作用的二次因子,5 为喷油器流量系数自身交互作用的二次因子,6 为凸轮型线速率自身交互作用的二次因子,7 为低压供油压力自身交互作用的二次因子,8 为控制阀杆升程与衔铁残余气隙交互作用的二次因子,9 为控制阀杆升程与喷油器针阀升程交互作用的二次因子,10 为控制阀杆升程与喷油器开启压力交互作用的二次因子,11 为控制阀杆升程与喷油器流量系数交互作用的二次因子,12 为控制阀杆升程与凸轮型线速率交互作用的二次因子,13 为控制阀杆升程与低压供油压力交互作用的二次因子,14 为衔铁残余气隙与喷油器针阀升程交互作用的二次因子,15 为衔铁残余气隙与喷油器开启压力交互作用的二次因子,16 为衔铁残余气隙与喷油器流量系数交互作用的二次因子,17 为衔铁残余气隙与凸轮型线速率交互作用的二次因子,18 为衔铁残余气隙与低压供油压力交互作用的二次因子,19 为喷油器针阀升程与喷油器开启压力交互作用的二次因子,20 为喷油器针阀升程与喷油器流量系数交互作用的二次因子,21 为喷油器针阀升程与凸轮型线速率交互作用的二次因子,22 为喷油器针阀升程与低压供油压力交互作用的二次因子,23 为喷油器开启压力与喷油器流量系数交互作用的二次因子,24 为喷油器开启压力与凸轮型线速率交互作用的二次因子,25 为喷油器开启压力与低压供油压力交互作用的二次因子,26 为喷油器流量系数与凸轮型线速率交互作用的二次因子,27 为喷油器流量系数与低压供油压力交互作用的二次因子,28 为凸轮型线速率与低压供油压力交互作用的二次因子。

如图 19 所示,全工况平面内,中等喷油脉宽工

况点,二次因子与循环喷油量的相关系数较小,最大值不超过 0.04。在小喷油脉宽和大喷油脉宽条件下,二次因子 1、2、3、4、5、6、7、9、12、17、19、21、24、26 与循环喷油量相关性比较明显且相关系数呈无规律变化,甚至存在正负方向的复杂变化,这说明系统参数间相互作用的二次因子与循环喷油量为非线性关系,当喷油系统处于低负荷和高负荷时,上述二次因子对循环喷油量有明显影响,引起循环喷油量波动,加剧了喷油系统的非线性程度,导致柴油机工作稳定性和可控性变差。因子 1、2、3、4、5、6、7 为参数自身交互作用的二次因子,是二次因子中的主要影响因子。这些因子与循环喷油量之间的相关系数在全工况平面均与循环喷油量有一定的相关性,其中二次因子 1、3、4、5、6 与循环喷油量的相关性和无交互作用下该参数的一次因子与循环喷油量的相关性相反,且在大喷油脉宽中高转速工况点二次因子 3 和 4 的相关系数与相应参数一次因子的相关系数处于同一量级甚至超过了一次因子的相关系数。这说明参数自身交互作用的二次因子与循环喷油量的相关性存在与参数本身一次因子与循环喷油量的相关性的变化规律不同的现象,增加了系统的非线性程度。

因子 9、12、17、19、21、24、26 为不同参数交互作用下的二次因子,是二次因子中的次要影响因子,其余二次因子在全工况平面内与循环喷油量无明显相关性。因子 9 为控制阀杆升程与喷油器针阀升程交互作用的二次因子,因子 19 为喷油器针阀升程与喷油器开启压力交互作用的二次因子,这两个因子与循环喷油量的相关性在全工况平面的变化趋势相似,均是在中、高速的小喷油脉宽工况点与循环喷油量有明显的相关性,并且都存在着正负方向的变化。由于这 3 个参数为同类参数,其变化均会影响有效喷油时间,在中、高转速的小脉宽工况下有效喷油时间短,因此因子 9 和 19 对有效喷油时间的影响增大,引起循环喷油量的波动增加。因子 12、17、21、24、26 为除去低压供油压力外的各参数与凸轮型线速率之间交互作用的二次因子(低压供油压力和各参数的交互作用二次因子与循环喷油量的相关系数为零,这是因为喷油过程中低压油路被切断,低压供油压力与各参数间不再相互影响,因此也不存在交互作用)。可见由于电控单体泵利用凸轮进行脉动供油的固有特性,造成了不仅凸轮型线速率的一次因子和自身交互作用的二次因子与循环喷油量之间有明显的相关性,而且凸轮型线速率与不同参数间交互作用的二次因子也与循环喷油量有明显的相关性。在不同参数之间的交互作用中,各参数与凸轮型线速率的耦合作用最为明显,因此优化凸轮型线,

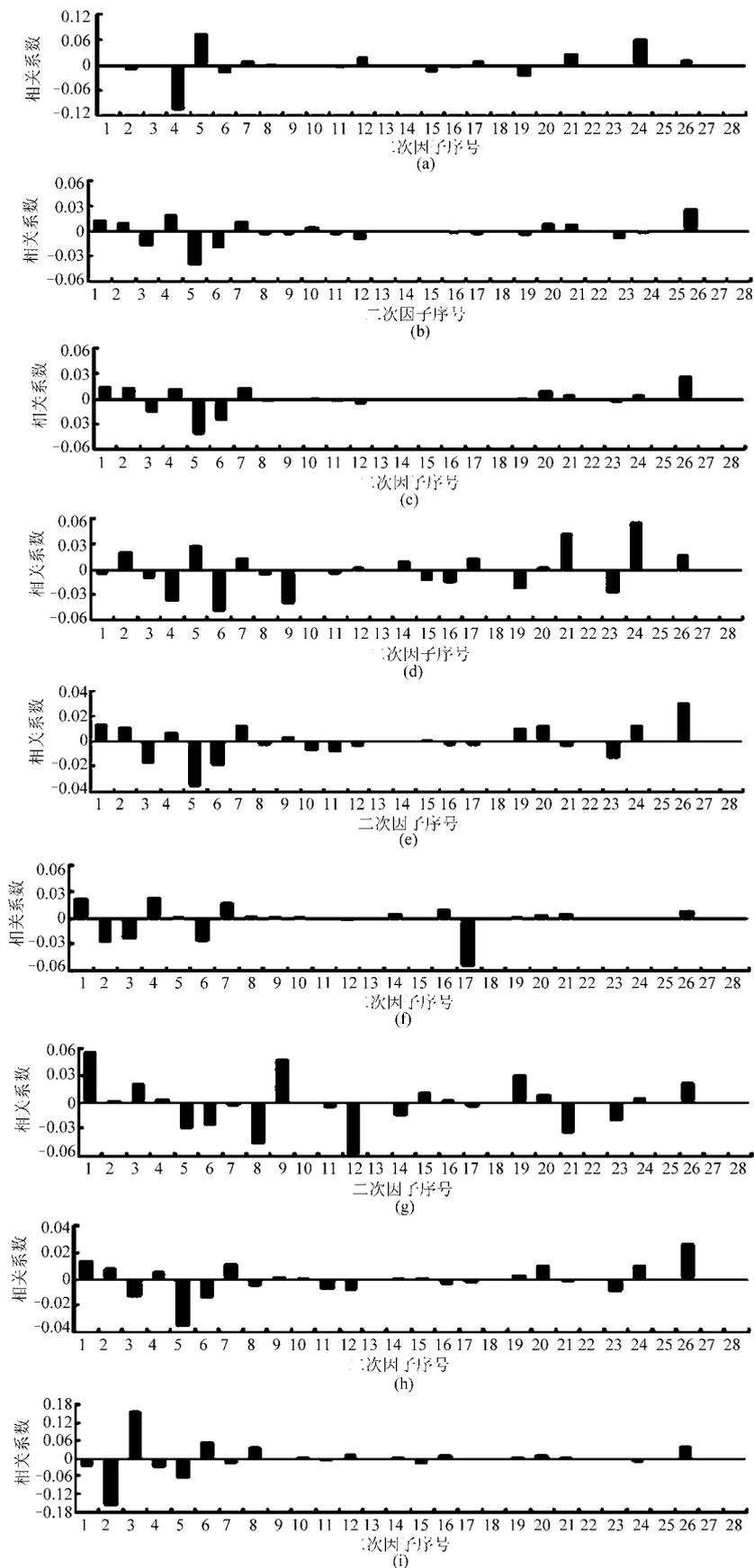


图 19 二阶交互作用下的二次因子与循环喷油量的相关性

Fig. 19 Correlation of second order factors with cycle fuel injection quantity under second order interaction condition

- (a) 500 r/min, 2°CA (b) 500 r/min, 8°CA (c) 500 r/min, 14°CA (d) 900 r/min, 2°CA (e) 900 r/min, 8°CA
- (f) 900 r/min, 14°CA (g) 1 300 r/min, 2°CA (h) 1 300 r/min, 8°CA (i) 1 300 r/min, 14°CA

进行凸轮型线速率与各参数间的解耦,是降低电控单体泵喷油系统非线性程度的重要手段之一。

通过对系统各特性参数交互作用下二次因子与循环喷油量的相关性分析可见,交互作用下与循环喷油量有明显相关性的二次因子主要有以下3类:参数自身交互作用下的二次因子;同类特性参数交互作用下的二次因子;不同参数与凸轮型线速率交互作用下的二次因子。

通过以上相关性分析可知,因多物力场的耦合作用,循环喷油量受各系统参数及参数间交互作用影响,使电控单体喷油系统表现出复杂的非线性。

## 5 结论

(1) 结合 AMESim 仿真模型和实验设计方法对电控单体泵喷油系统进行了仿真,通过对系统各特性参数及参数间相互作用与循环喷油量的相关性分

析,得到了全工况平面内有无参数交互作用下的因子与循环喷油量的相关系数,揭示了各特性参数及参数间交互作用因子与循环喷油量之间相关性的变化规律。

(2) 无参数交互作用下全工况平面内与循环喷油量有显著相关性的特性参数分别为低压供油压力、凸轮型线速率、控制阀杆升程、喷油器开启压力、喷油器针阀升程和喷油器流量系数。

(3) 得出交互作用下各参数自身交互作用的二次因子、同类特性参数交互作用下的二次因子和不同参数与凸轮型线速率交互作用下的二次因子与循环喷油量有明显的相关性,其中参数自身交互作用的二次因子是二次因子中的主要影响因子。

(4) 凸轮型线速率的一次因子、自身交互作用的二次因子及与不同参数间交互作用的二次因子与循环喷油量均具有明显的相关性。

## 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 920240, 1992.
- 2 Cantore G, Mattarelli E, Boretti A. Experimental and theoretical analysis of a diesel fuel injection system [C]. SAE Paper 1999-01-0199, 1999.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 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 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): 21~24.  
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): 21~24. (in Chinese)
- 8 杨时威, 吴长水, 冒晓建, 等. 电控单体泵燃油喷射系统控制方法研究[J]. 内燃机工程, 2008, 29(3): 6~11.  
Yang Shiwei, Wu Changshui, Mao Xiaojian, et al. Research on the control strategy of fuel injection system with electronic unit pump [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(3): 6~11. (in Chinese)
- 9 范立云, 田丙奇, 马修真, 等. 电控单体泵喷射特性关键影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 14~20.  
Fan Liyun, Tian Bingqi, Ma Xiuzhen, et al. Key influence factors investigation on the electronic unit pump injection characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 14~20. (in Chinese)
- 10 王裕鹏, 刘福水, 刘兴华, 等. 单缸电控单体泵低压油路供油特性[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 24~29.  
Wang Yupeng, Liu Fushui, Liu Xinghua, et al. Characteristics of fuel supply loop for electronic unit pump fuel system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 24~29. (in Chinese)
- 11 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.
- 12 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.
- 13 茆诗松, 周纪芃, 陈颖. 实验设计 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2004: 117~124.