

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.006

# 高压双电磁阀控制燃油系统控制策略研究\*

王裕鹏 刘福水 刘兴华

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**【摘要】** 根据双电磁阀控制燃油系统的工作原理,讨论了可采用的溢流控制阀(SV)和针阀控制阀(NCV)控制模式;针对不同的控制模式,分析了从控制信号到燃油喷射的延时特性,揭示了动态喷嘴启喷压力(NOP)随转速的变化规律,探讨了双阀燃油系统的燃油喷射特性,并进行试验。结果表明SV相对于NCV的控制角度差值能够有效地改变NOP、NCP(喷嘴关闭压力)和MFIP(平均燃油喷射压力)的大小。着重探讨了双阀燃油系统的控制算法,阐述了NCV目标喷油持续期和目標喷油提前角的控制方法,提出了NOP控制及双阀燃油系统总体控制策略,并给出了反映NOP随转速和控制角度差值变化而变化的NOP控制MAP,为双阀燃油系统的整车应用提供了基础。

**关键词:** 双电磁阀燃油系统 控制策略 喷嘴启喷压力

中图分类号:TK421.4 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2012)01-0028-05

## Control Strategy of High-pressure Two-actuator Fuel Injection System

Wang Yupeng Liu Fushui Liu Xinghua

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

### Abstract

According to the working principle of the two-actuator fuel injection system, the available control modes were discussed firstly, the delay time from control signal to fuel injection was analyzed, variation characteristics of NOP at different speeds were figured out and injection characteristics were explored then, the experimental results showed that the difference between SV and NCV control angle could change the value of NOP, NCP and MFIP effectively. Finally, the control algorithms were explored emphatically, calculating method for NCV desired SOI and durations were introduced and the control strategy of two-actuator fuel injection system was proposed, and the NOP control MAP that reflected its tendency with different speeds and the control angle difference was analyzed, which provided the basic theory for vehicle purpose.

**Key words** Two-actuator fuel injection system, Control strategy, Nozzle opening pressure

### 引言

双电磁阀控制燃油系统(以下简称双阀燃油系统)不但能够实现高压喷射、灵活可控的喷油正时和精确的喷油量,还能够柔性地调节喷油速率和启喷压力,是柴油机燃油系统重点发展的方向之一<sup>[1]</sup>。

目前国外典型的双阀燃油系统有Bosch的APCRS系统、Delphi的E3系统和Benz的Smart

EUP系统等。国外部分学术机构也开始开展这方面研究<sup>[2-4]</sup>,国内北京理工大学<sup>[5-7]</sup>探讨了双阀燃油系统在不同控制条件下的燃油喷射特性,建立了仿真优化平台,并分析了其多次喷射能力。虽然双阀燃油系统具有喷射规律灵活可调的能力,但需综合匹配两个电磁阀之间的关系来实现,而且双阀燃油系统与电控单体泵燃油系统控制原理完全不同,本文将探索适合双阀燃油系统的控制策略。

收稿日期:2011-01-24 修回日期:2011-03-26

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(97361357)、国家自然科学基金资助项目(51006012)和国防预先研究资助项目(40402040103)

作者简介:王裕鹏,博士生,主要从事柴油机燃油系统及电子控制研究,E-mail:w.yu@163.com

通讯作者:刘福水,教授,博士生导师,主要从事内燃机工作过程优化研究,E-mail:fushui\_liu@bit.edu.cn

## 1 双阀燃油系统原理及特点

双阀燃油系统的控制主要是通过电控单体泵端的溢流控制阀 (spill-control valve, 简称 SV) 和喷油器端的针阀控制阀 (needle control valve, 简称 NCV) 分别独立地控制燃油的供给和喷射过程来实现的。电控单体泵为双阀燃油系统的供油部件, 通过控制 SV 的通断电可以保证高压燃油的产生和供给, 其控制参数分别为供油提前角和供油持续期; 喷油器为喷油部件, 通过控制 NCV 的通断电来实现燃油喷射, 其控制参数分别为喷油提前角和喷油持续期。在 SV 保持通电状态时, 双阀燃油系统通过 NCV 控制回油通道的通断, 从而实现高压喷射。双阀燃油系统结构如图 1 所示。

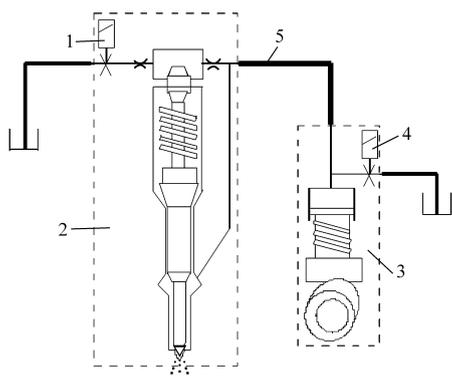


图 1 双阀燃油系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of two-actuator fuel system

1. NCV 2. 喷油器 3. 电控单体泵 4. SV 5. 高压油管

双阀燃油系统相对共轨燃油喷射系统而言, 由于燃油喷射压力是循环间控制建立的, 因此该压力的提高和降低不存在根本的延迟, 而这种情况却可能在共轨系统发生, 因为共轨腔内压力的调节需要一定的时间<sup>[3]</sup>; 而与电控单体泵燃油系统相比, 双阀燃油系统可以灵活地控制喷嘴启喷压力 (nozzle opening pressure, 简称 NOP)。因此, 循环间灵活可控地调节 NOP 是双阀燃油系统相对于传统燃油系统所具有的独特特征。双阀燃油系统优势的发挥都是以合理精确的控制策略为前提。

## 2 试验装置

在单缸柴油机上应用双阀燃油系统进行试验研究, 其原理如图 2 所示。用单缸机控制系统控制输油泵的供油压力和凸轮轴转速; 数据采集系统采集高压油管燃油压力、喷油速率和喷油量; 高压油管上的保护阀用来防止高压油管内燃油压力超限。单缸柴油机主要参数如表 1 所示。

试验中, 保持 SV 与 NCV 同时断电, 即控制信号的结束时刻一致; 改变 SV 与 NCV 开始时刻驱动电

流间的控制角度差值, 探讨单缸柴油机双阀燃油系统在不同转速时的喷射特性。

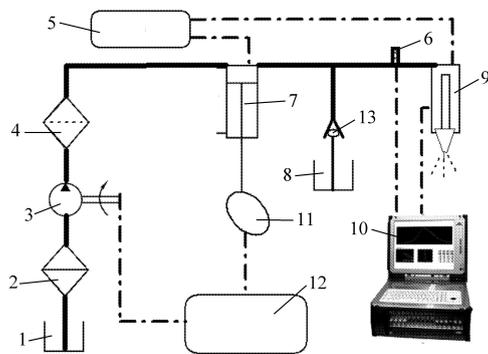


图 2 单缸柴油机中应用的双阀燃油系统原理图

Fig. 2 Two-actuator fuel system in single cylinder engine

1. 油箱 2. 粗过滤器 3. 输油泵 4. 精过滤器 5. ECU 6. 油压传感器 7. 电控单体泵 9. 喷油器 10. 数据采集系统 11. 曲轴凸轮轴 12. 单缸机控制系统 13. 保护阀

表 1 单缸柴油机主要参数

Tab. 1 Parameters for single cylinder diesel engine

组件	来源	参数	数值
单缸机	自制	缸径 × 冲程/mm × mm	132 × 145
单体泵	Delphi E1	柱塞直径/mm	11
		凸轮升程/mm	18
喷油器	Bosch	喷孔数/个	7
		流量/L·min <sup>-1</sup>	1.5
ECU	自主研发	SV 驱动电流 <sup>[8]</sup> /A	11, 5
		NCV 驱动电流/A	18, 10

## 3 控制模式及双阀燃油系统特性分析

根据 SV 和 NCV 不同控制正时, 可以将双阀系统分为 NCV 控制模式和 SV 控制模式。

### 3.1 NCV 控制模式

NCV 控制模式是 SV 控制信号涵盖 NCV, NCV 控制信号开始时刻小于 SV, 而两者结束时刻相同。此时, 喷射开始时刻由 NCV 决定。

#### 3.1.1 NCV 控制模式下控制延时

NCV 从电磁阀通电到喷油存在电、磁、机械和液压等延迟作用, 弄清双阀燃油系统延迟时间的规律, 有助于利用控制器对控制信号和喷油规律之间的关系进行修正。发动机转速 1 000 r/min 时 NCV 控制模式的试验结果如图 3 所示。

从图 3a 可见, 在 TDC 处 SV 和 NCV 驱动电流同时断电, 而 SV 供油相对于 NCV 喷油的驱动电流间存在一定的控制角度差值, 此时从喷油速率可以看出 NOP 为 85 MPa。从图 3b 中可见, 控制角度差值为  $\alpha_3 - \alpha_1$ , SV 供油延迟角度为  $\alpha_2 - \alpha_1$  ( $\alpha_2$  为燃油压力达到动态 NOP 的角度, 将在后面讨论), 而

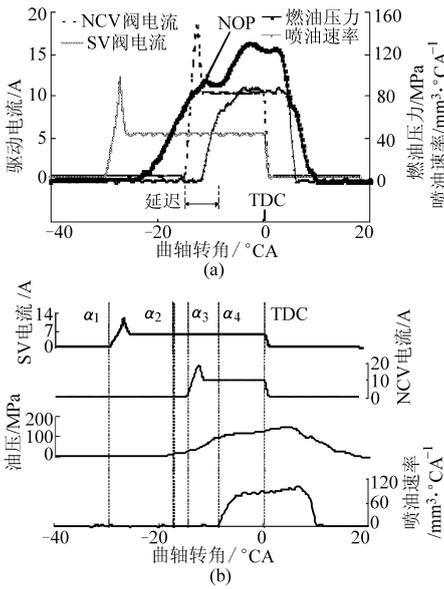


图3 NCV控制模式下双阀燃油系统延迟特性  
Fig. 3 Delay characteristics in NCV control mode  
(a) 电流和油压、速率之间的关系 (b) 图3a分解图

NCV 喷油延迟角度为  $\alpha_4 - \alpha_3$ 。双阀燃油系统中的延迟主要包括电磁阀从通电到产生电磁力的电磁延迟、衔铁吸合运动产生的机械延迟、燃油压力传播的液压延迟等。

在 NCV 控制模式下,由于延迟作用的存在,控制角度差值  $\alpha_3 - \alpha_1$  必须大于 SV 供油延迟角度  $\alpha_2 - \alpha_1$ ,同时需要考虑 NCV 喷油延迟角度  $\alpha_4 - \alpha_3$ ,从而能够采用 NCV 对喷油正时进行控制。

### 3.1.2 NCV 控制模式下双阀燃油系统特性

图4为发动机转速 1000 r/min 时,改变控制角度差值时双阀燃油系统喷射特性的变化。可以看出,通过改变控制角度差值  $\alpha_3 - \alpha_1$ ,可以有效地改变双阀燃油系统的 NOP。NOP 不仅能够有效降低排放,而且还可满足特殊工况对启喷压力要求,如启动工况提供较高喷射压力、怠速工况保证精确喷油量和高速大负荷需要较大喷油量等,均可通过调整 NOP 来实现。

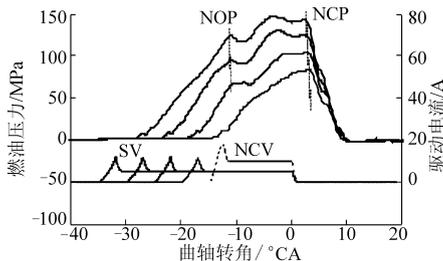


图4 不同控制角度差值时燃油压力变化曲线  
Fig. 4 Variations of fuel pressure with control signal

随着 NOP 的升高,也大幅度提高了整个喷射阶段内的平均燃油喷射压力 (mean fuel injection pressure, 简称 MFIP) 和喷嘴关闭压力 (nozzle

closing pressure, 简称 NCP), NOP、MFIP 和 NCP 随着控制角度差值的增加而不断增加,如图5所示。

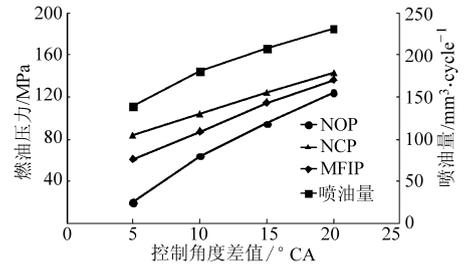


图5 NOP、NCP、MFIP和喷油量的变化曲线

Fig. 5 Variations of NOP, NCP, MFIP and injection volume

虽然 NCV 控制参数不变,但 MFIP 的提高使喷油量大幅增加,这使得燃油系统产生相同喷油量所需的喷油持续期更短;同时,加上 NOP、NCP 循环间灵活可调,对改善燃油雾化、加快混合速度具有重要的作用,柴油机根据工况需要,可得到理想的燃油喷射特性。

通过上述分析可以看出,在 NCV 控制模式下,双阀燃油系统的启喷时刻由 NCV 控制参数固定,SV 相对于 NCV 的控制角度差值能够有效地改变 NOP、NCP 和 MFIP。本研究中对双阀燃油系统控制主要是针对 NOP,而 MFIP 和 NCP 等其他影响喷油器动作的因素也可以作为算法的控制对象,但本文未涉及,它们的影响通过喷油量来反映。

### 3.2 SV 控制模式

SV 控制模式是 NCV 控制信号涵盖 SV,NCV 控制信号开始时刻大于等于 SV,而两者结束时刻相同。此时,喷射开始时刻由 NCV 动态 NOP 的大小决定。

SV 控制模式及延时特性如图6所示,其延迟和燃油喷射特性与 NCV 控制模式下系统特性基本一致,但不同的是 NOP 的变化规律。喷油器不工作时,静态 NOP 是一个常数,它由喷油器内的弹簧预紧力决定;但喷油器工作时,动态 NOP 为一变量,是发动机转速的函数,其随转速的变化关系如图7所示。可以看出 SV 控制模式下,动态 NOP 随着转速升高呈线性增加。对应每个转速,动态 NOP 是双阀燃油系统启喷压力的最低值。

因此在发动机控制时,可以在怠速状态使用 SV 控

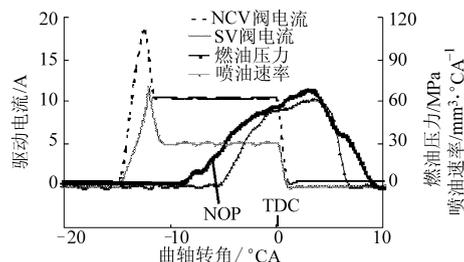


图6 SV控制模式下延时特性和燃油喷射特性  
Fig. 6 Delay and fuel injection characteristics in SV control mode

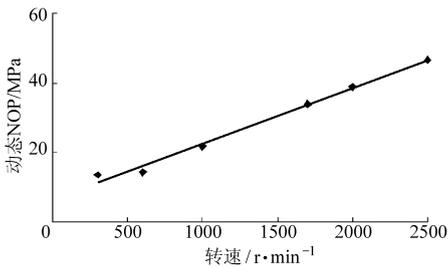


图 7 SV 控制模式下动态 NOP 变化规律

Fig. 7 Variations of dynamic NOP in SV control mode

制模式,对较少的燃油喷射量进行更加精确控制;而在其他工况下,采用 NCV 控制模式,进行启喷压力和喷油量的精确控制,满足发动机功率和排放的需求。

### 4 双阀燃油系统控制算法

根据前述分析,确定双阀燃油系统的控制参数为 NOP、供油持续期和提前角、喷油持续期和提前角 5 个变量。在控制算法中采用油门位置信号和发动机转速信号作为基本输入量,而将冷却水温度、燃油温度、进气温度以及压力作为修正补偿量。

#### 4.1 NCV 目标喷油持续期

NCV 目标喷油持续期需查基本喷油量 MAP 后加入水温和燃油温度修正得出,计算方法见图 8。PID 控制器的输入是发动机实际转速与目标转速的差值,输出是循环喷油量;循环喷油量与冒烟极限油量相比后取最小值,然后根据当前发动机水温和燃油温度进行修正,输出 NCV 目标喷油持续期。

#### 4.2 NCV 目标喷油提前角

喷油提前角影响柴油机工作时的压力升高率、最高燃烧压力、排气温度等参数,对于每一个工况均存在最佳喷油提前角,喷油提前角的控制逻辑如

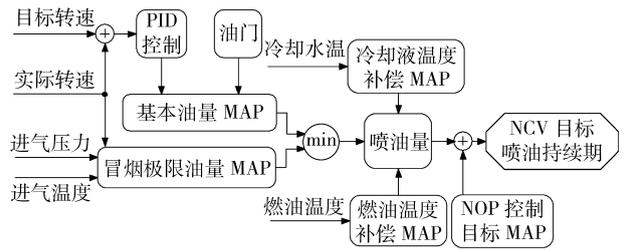


图 8 目标喷油持续期计算方法

Fig. 8 Calculating methods of desired injection duration

图 9 所示。输入量为 NCV 目标喷油持续期和转速,通过查询负荷 MAP 并根据进气压力和冷却水温进行修正,输出 NCV 阀目标喷油提前角。

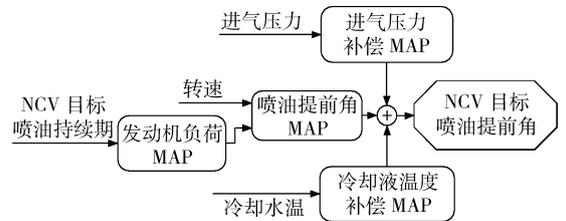


图 9 目标喷油提前角计算方法

Fig. 9 Calculating methods of desired SOI

#### 4.3 NOP 控制及双阀燃油系统控制

当计算出 NCV 目标喷油提前角和持续期,即可采用图 10 的控制逻辑对 SV 和 NCV 控制信号进行计算,同时完成对 NOP 的控制。该算法中考虑了系统延迟、执行器响应和转速等因素对两个电磁阀的影响,并将 SV 和 NCV 两种控制模式融合到一起。在转速一定的情况下,算法的输入量是 NOP 控制目标、NCV 目标喷油提前角和目标喷油持续期(喷油量);算法输出量为 ECU 产生的供油和喷油控制信号(虚线框内),包括 SV 供油提前角和供油持续期、

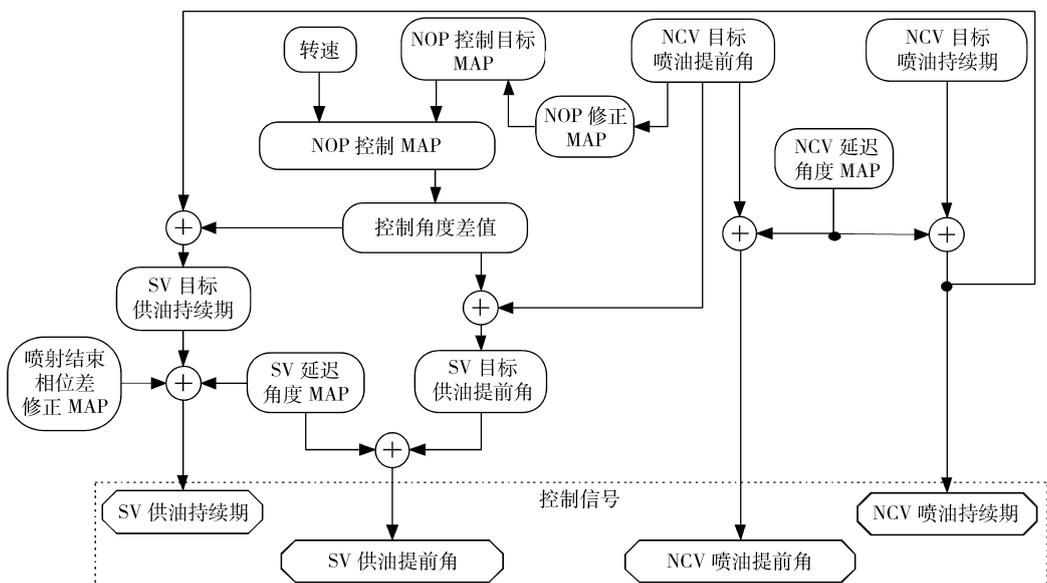


图 10 双阀燃油系统控制逻辑图

Fig. 10 Control strategy of two-actuator fuel injection system

NCV 阀喷油提前角和喷油持续期等。

算法计算中, NCV 喷油控制信号是在得到 NCV 目标喷油提前角和目标喷油持续期的基础上, 通过一定的延迟修正来获取。而 SV 供油控制信号计算时, 首先需要根据发动机运行工况和发动机排放水平确定该工况下双阀燃油系统的目标 NOP, 并根据当前 NCV 目标喷油提前角对该 NOP 进行修正; 然后, 通过 NOP 控制 MAP 查询出控制角度差值的大小, 计算出 SV 目标供油提前角和目标供油持续期; 最后, 采用 SV 延迟 MAP 和喷射结束相位差 MAP 进行一定修正, 得到 SV 供油控制信号。

输出的控制信号中, NCV 喷油提前角由 NCV 目标供油提前角和其延迟角度决定, SV 喷油提前角也是如此; NCV 供油持续期由 NCV 目标供油持续期和其延迟角度决定, 而 SV 供油持续期则考虑了控制信号结束时刻 SV 相对于 NCV 的相位差变动对喷射特性影响, 对 SV 结束时刻进行一定修正, 其原则是当 NCP 较高并保证快速断油基础上, 适当地利用压缩后的高压燃油。

NOP 修正 MAP 考虑了不同 NCV 目标喷油提前角的变化对 NOP 的影响, 这主要由供油凸轮的型线和速度决定。而 NOP 控制是控制逻辑中一个十分重要的 MAP 图, 也是区别于现有主流燃油喷射系统的主要方面。NCV 目标喷油提前角为 BTDC  $5^{\circ}\text{CA}$  时, NOP 控制 MAP 如图 11 所示。

NOP 控制 MAP 中主要反映出 NOP 随转速和控制角度差值的变化关系, MAP 中已经包含双阀系统各参数之间延迟作用。在单缸机柴油机运行时, 柴油机即可根据当前工况所需的 NOP, 从 MAP 中获得控制角度差值, 从而得到 SV 控制参数。

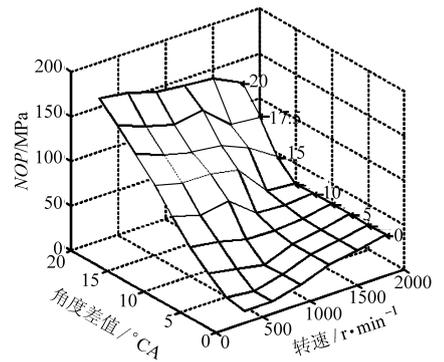


图 11 NOP 控制 MAP

Fig. 11 NOP control MAP

## 5 结论

(1) 在 NCV 控制模式下, 由于延迟作用的存在, 控制角度差值必须大于 SV 供油延迟角度, 同时需要考虑 NCV 喷油延迟角度, 从而能采用 NCV 对喷油正时进行控制; 从试验结果可知, SV 相对于 NCV 的控制角度差值能够有效地改变 NOP、NCP 和 MFIP。本研究中对双阀燃油系统控制主要是针对 NOP, 而 MFIP 和 NCP 等影响则通过喷油量来反映。

(2) 在 SV 控制模式下, 动态 NOP 随着转速升高呈线性增加, 该模式可用于对较少的燃油喷射量进行精确控制。

(3) 提出了区别于现有主流燃油系统的双阀燃油系统控制逻辑, 其控制参数分别为 NOP、供油持续期和提前角、喷油持续期和提前角 5 个变量。

(4) 探讨了采用控制角度差值实现 NOP 控制的方法, 并给出了反映 NOP 随转速和控制角度差值变化而变化的 NOP 控制 MAP, 为双阀燃油系统的整车应用提供了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Wolverton M A, Kiss T. Analytical comparison of 2 and 3 way digital valves for use on direct needle control fuel injectors [C]. SAE Paper 20040032, 2004.
- 2 Godfrey Greeves, Simon Tullis, Barrie Barker. Advanced two-actuator EUI and emission reduction for heavy-duty diesel engines [C]. SAE Paper 20030698, 2003.
- 3 Rente T, Gjirja S, Denbratt I. Experimental investigation of the effect of needle opening pressure (NOP) on combustion and emissions formation in a heavy duty DI diesel engine [C]. SAE Paper 20042921, 2004.
- 4 Huang Yiqun, Jeffrey Leet. Investigation of in-cylinder  $\text{NO}_x$  and PM reduction with Delphi E3 flexible unit injectors on a heavy-duty diesel engine [C]. SAE Paper 20081792, 2008.
- 5 仇滔, 刘兴华, 刘福水, 等. 一种新型的双电磁阀燃油系统 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(8): 674 ~ 677.
- 6 仇滔, 刘兴华, 刘福水, 等. 高压双电磁阀燃油系统特性分析 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 6 ~ 9.
- 7 Qiu Tao, Liu Xinghua, Liu Fushui, et al. Characteristics analysis of double valves fuel system with high pressure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2008, 39(11): 6 ~ 9. (in Chinese)
- 8 Wang Yupeng, Liu Xinghua, Liu Fushui. Simulation investigation on the multiple injections of two-actuator controlled fuel injection system [C] // 2010. International Conference on Energy and Environment Technology (ICEET), 2010.
- 9 Wang Yupeng, Liu Xinghua, Chen Yuhang, et al. The optimal drive current of solenoid valve and analysis of its effect on injection characteristic [C] // 2010. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010; 2 383 ~ 2 387.