

# 集成式电控单体泵特性及整机匹配

仇滔<sup>1</sup>, 刘兴华<sup>1</sup>, 刘福水<sup>1</sup>, 范伯元<sup>2</sup>, 张红光<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2. 北京工业大学环能学院, 北京 100124)

**摘 要:** 根据传统直列泵泵体结构设计了集成式电控单体泵燃油系统, 实现在沿用发动机机体的条件下对柴油机进行改进; 进行了集成式电控单体泵燃油系统在不同油管长度和不同转速下的特性试验. 以 YN4D44 直列泵柴油机为对象, 采用集成式电控单体泵燃油系统进行了整机改造, 优化了喷油嘴流量, 并进行了整机试验, 结果表明, 集成式电控单体泵燃油系统在高压油管过长、转速太高时性能将下降, 集成式电控单体泵燃油系统应用于传统发动机改造能大幅提高排放性能.

**关键词:** 柴油机; 电控单体泵; 仿真; 排放

**中图分类号:** U 464

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2009)04-0447-05

采用新型燃油系统对现有柴油机进行技术改造<sup>[1]</sup>, 以较低成本达标国Ⅲ排放法规是推动已形成大规模生产应用的机械直列泵柴油机技术升级的切实可行途径. 电控单体泵燃油喷射系统(EUP)是实现国Ⅲ排放标准的有效燃油喷射方案. 传统 EUP 安装在发动机机体上, 每缸一泵, 由侧置凸轮轴驱动, 高压油管较短. 若直接采用 EUP 对我国现有直列泵柴油机改造, 至少需要重新加工发动机缸体, 成本较高<sup>[2-3]</sup>. 如果将单体泵集成在一个类似于直列泵的泵体内, 构成集成式单体泵燃油系统, 且该系统的供油凸轮轴驱动方式与接口和传统直列泵保持一致, 再通过高压油管与喷油器连接, 则可实现现有发动机直接改造<sup>[4]</sup>.

采用集成式电控单体泵(IEUP)方案的结果是单体泵与喷油器的距离变远, 高压油管需要加长. 高压油管是连接喷油泵和喷油器的纽带, 其中有复杂的液力过程, 直接影响系统的喷射特性和发动机性能, 因此, 需要重新研究 IEUP 在长高压油管下的供油特性. 另外还需要研究 IEUP 与高速柴油机匹配时, 其电磁阀响应及压力特性是否能满足高速供油的需求.

本文对北京理工大学与北京京创智能动力有限公司合作开发的集成电控单体泵燃油喷射系统进行了试验研究, 并采用该燃油系统对 YN4D44 柴油机进行了整机匹配.

## 1 集成式电控单体泵

IEUP 集成泵体用铸铝制成. 泵体上部等间距排列 EUP 安装孔. 在箱体上部与 EUP 进油孔等高的位置上从自由端到驱动端加工有横向通孔, 将所有 EUP 的进、回油孔连通. 泵体下部是凸轮轴安装腔, 凸轮轴轴承采用滑动轴承, 有专门的压力润滑油道, 压力机油来源于发动机. 泵体上同时设置低压输油泵和凸轮位置信号传感器. IEUP 燃油系统在发动机上的安装和直列泵相似, 图 1 是发动机油泵安装侧图.

由于 IEUP 燃油系统没有调速器等机构, 因此原

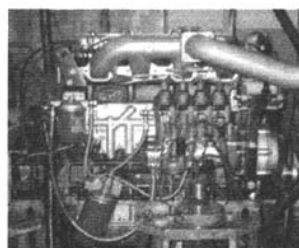


图 1 安装有 IEUP 的柴油机

Fig. 1 Diesel engine with IEUP

收稿日期: 2007-09-18.

基金项目: 国防 973 资助项目(61357).

作者简介: 仇滔(1976—), 男, 湖南岳阳人, 讲师.

来的油泵安装空间能满足 IEUP 燃油系统的安装需求。

## 2 油泵试验分析

### 2.1 油管长度对 IEUP 的影响

在凸轮转速为 1 250 r/min、控制持续期为 10° 凸轮转角下进行高压油管长度 ( $L$ ) 分别为 200、600 和 1 000 mm 的试验。图 2 是不同油管长度对应的油管压力 ( $P$ ) 和针阀升程的试验结果。可以看出, 在喷嘴相同、持续期一定时, 高压油管越长, 喷射压力越低。200 和 600 mm 油管的油管嘴端压力波形较稳定, 喷油结束干脆。1 000 mm 油管的管内压力波动很大, 结束喷油时压力下降缓慢, 针阀关闭不干脆。

油管长度太长, 喷射峰值压力下降显著, 压力波动较大, 喷油结束不干脆, 可能导致二次喷射。要达到相同循环供油量要求, 长油管对应的喷射压力较低, 因此需要更大的喷射持续角度, 燃烧持续期加长, 而且燃油雾化效果会变差, 所以 IEUP 不宜采用过长的高压油管。

### 2.2 转速对集成式单体泵的影响

图 3 是在不同高压油管长度、固定喷油持续角度下循环供油量随转速的变化规律。随着凸轮轴转速的升高实际喷射持续时间缩短, 循环供油量下降。

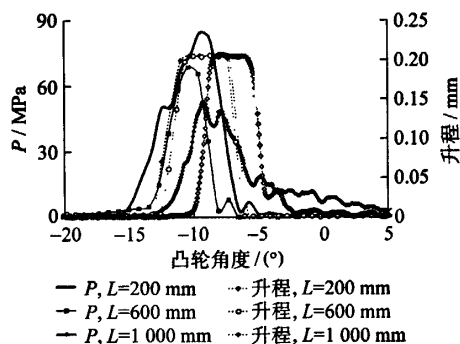


图 2 不同油管长度下的特性

Fig.2 Performances with different length pipes

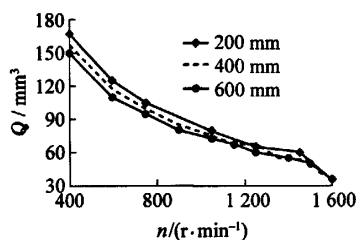


图 3 不同油管长度在不同凸轮转速下的喷油量的对比

Fig.3 The contrast of injection fuel mass in different cam speeds and pipe lengths

在喷油台架上, 采用 400 mm 长的高压油管, 电磁阀控制脉宽为 15° 凸轮转角, 对集成式电控单体泵燃油系统分别进行不同转速下的试验。图 4 是 IEUP 的针阀升程随凸轮转速变化的试验结果。图 5 是油管嘴端压力随凸轮转速变化的试验曲线。

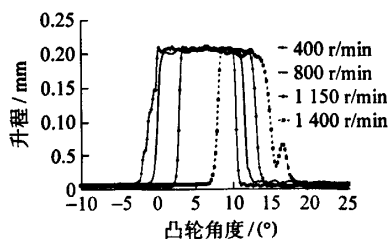


图 4 针阀升程随转速的变化

Fig.4 Needle lifts in different speeds

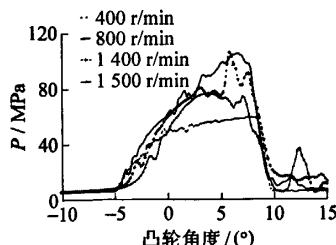


图 5 不同转速下的油管压力

Fig.5 Pressure of the pipe in different speeds

在 400~1 150 r/min 的转速范围内, IEUP 供油系统泵端压力没有出现负压, 没有出现针阀的二次开启, 在高速范围内能够稳定的维持较高压力, 循环油量和油管压力波较稳定。当凸轮轴转速达到 1 400

r/min 时,针阀开启相对于供油时刻已经非常滞后,针阀开启保持时间明显缩短,高压油管压力出现波动并且针阀出现反跳,已经不能保证正常的燃油喷射。所以 IEUP 不宜应用于过高转速的柴油机。

### 2.3 各缸喷油均匀性试验

喷油系统各缸喷油均匀是柴油机开环控制的前提,较差的均匀性会导致发动机整体性能变差。图6是在相同的提前角、不同转速下进行的各缸均匀性的试验结果。

凸轮转速为 1 200 r/min 以下,不均匀度小于 5%,凸轮转速为 1 200~1 400 r/min,不均匀度有所加大,说明 IEUP 随转速增大,其不均匀程度趋于严重。

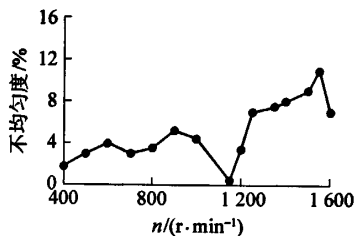


图6 喷油均匀性试验结果

Fig.6 The inhomogeneity of injection quantity

## 3 整机匹配

云内 YN4D44 柴油机是满足欧 II 法规的增压中冷柴油机,燃油系统采用带电子调速器的直列泵燃油系统。考虑到生产延续性,采用集成式电控单体泵进行原发动机的改造。

根据发动机的结构,高压油管长度选取 400 mm。喷嘴是影响柴油机性能的主要部件之一,喷嘴的有效喷射面积决定了喷嘴的流量。当油泵参数确定后,喷嘴流量决定了喷射压力和喷射率<sup>[5]</sup>,因此,需要重新匹配喷嘴流量。喷嘴流量(在 10 MPa 的压差下流量, L/min)的选择必须在合适的喷射持续角度内满足最大循环油量的要求,并保证一定的喷射压力。

采用 AMESim 仿真软件对 IEUP 供油系统进行仿真计算。图7是在 AMESim 建立的 IEUP 的单缸仿真模型。

图8是对所建立的仿真计算模型校核和验证的结果。由于 AMESim 是一维仿真软件,其优点主要是准确细致的反映液力特性,而对系统的机械特性反映较差<sup>[6]</sup>,计算结果不能细致的反映针阀波动的机械特性,但是仿真结果和试验结果在喷射开始和喷射结束 2 个时刻以及压力波峰值和趋势上符合得很好,可以为 IEUP 的参数设计做方向性的预测。

根据原 YN4D44 直列泵柴油机的功率需求计算需要的每循环供油量为

$$Q = \frac{g_e P_e}{60 n \rho Z i} \times 1\,000 \text{ mm}^3$$

式中,  $g_e$  为比油耗(g/(kW·h));  $P_e$  为柴油机输出功率(kW);  $n$  为柴油机转速(r/min);  $\rho$  为燃油密度,取  $\rho = 0.84 \text{ g/cm}^3$ ;  $Z$  为冲程系数,四冲程  $Z = 0.5$ ;  $i$  为缸数。

得到该发动机在最大功率点下的每循环供油量为  $84 \text{ mm}^3$ 。考虑到喷孔加工工艺和传统的习惯,本文选用 5 孔的喷嘴。图9是计算出来的不同喷孔流量在满足循环油量的喷射持续期和压力结果。

高压喷射是柴油机提高性能的首要条件,为了降低排放,需要保证最大供油压力不低于 130 MPa,而集成式电控单体泵属于外挂方式,必须考虑机械负荷和驱动扭矩的限制,所以必须限制最大供油压力。本文将最大压力限制在 150 MPa。喷嘴流量大则在大负荷时可以缩短喷射持续期,但是在小负荷时由于对应的喷射持续期太短将较难保持喷油稳定,循环变动加大,因此喷射持续角度必须适当。本文选择最大功率点喷油持续期为  $25^\circ$  曲轴转角左右<sup>[7]</sup>。

综合上述 2 个约束确定采用  $5 \times 0.22 \text{ mm}$  的喷嘴,流量在 10 MPa 压差下为 1.32 L/min。由于沿用原

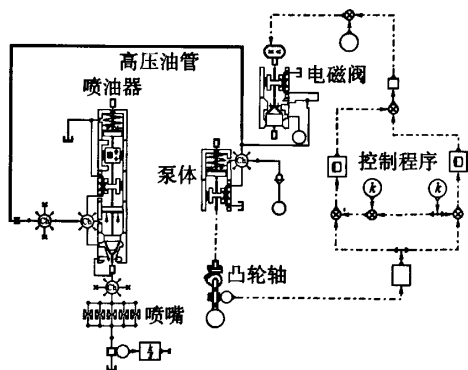


图7 IEUP 的供油系统仿真模型

Fig.7 Simulation model of fuel injection system

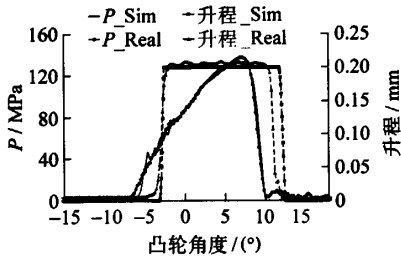


图 8 仿真和实验结果的比较

Fig.8 The contrast of simulation and test results

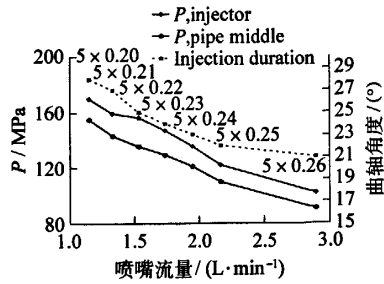


图 9 不同喷嘴流量的特性预测

Fig.9 The performances estimate of different flow rates

机燃烧室等部件,喷射夹角等参数仍然参照原来值.

### 4 整机试验

控制系统采用 Dspace/Microautobox 设计,能灵活实现各个工况点的提前角和持续期可调.采用扫描优化的方法对每个工况点的提前角进行了优化.分别进行了原直列泵发动机和采用 IEUP 的改进发动机的欧 II 和欧 III 排放试验,表 1 为对比结果.

表 1 改造前后排放比较

Table 1 The contrast analysis of different emission standards

g/(kW·h)

| 项目    |      | CO   | HC   | NO <sub>x</sub> | PM   |
|-------|------|------|------|-----------------|------|
| 欧 II  | 原机   | 0.96 | 0.25 | 12.46           | 0.3  |
|       | IEUP | 0.9  | 0.4  | 6.29            | 0.15 |
|       | 限值   | 4    | 1.1  | 7               | 0.15 |
| 欧 III | 原机   | 0.64 | 0.36 | 5.4             | 0.26 |
|       | IEUP | 1.03 | 0.41 | 4.82            | 0.18 |
|       | 限值   | 2.1  | 0.66 | 5               | 0.1  |

采用 IEUP 的电控机与原机相比,降低了排放并全面达到了欧 II 排放标准;欧 III 循环试验结果表明,NO<sub>x</sub> 在保证达到限值后,颗粒没有达到限值;控制 PM 排放核心是改善混合气形成和燃烧过程.进一步优化空燃比和缸内流动,增加喷孔数,将两气门改变为四气门,降低机油消耗,提高喷射压力会进一步降低 PM 排放<sup>[8]</sup>.

### 5 结束语

设计了集成式电控单体泵燃油系统,通过油泵试验研究了 IEUP 集成式电控单体泵的特性并进行传统直列泵发动机改造的匹配.改造前后柴油机的整机对比试验表明,IEUP 燃油系统可以大幅提高传统发动机性能.如果配合进气系统和燃烧系统的优化,将进一步提高柴油机的排放性能.

#### 参考文献:

- [1] ROY M C. Evolution of diesel fuel injection equipment-the last 20 years[C/CD]//SAE. 933015.
  - [2] 王尚勇, 杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 34-35.
  - [3] 仇滔, 刘兴华, 刘福水. 电控单体泵燃油系统凸轮型线优化研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(5): 476-479.
- QIU Tao, LIU Xing-hua, LIU Fu-shui. The study for cam profile design of EUP[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26

- (5): 476-479. (in Chinese)
- [4] 白向东. IEUP 柴油机排放控制优化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.  
BAI Xiang-dong. IEUP diesel engine emission control optimization research[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] 初纶孔. 柴油机供油与雾化[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 133.
- [6] 仇滔, 刘兴华. 电控单体泵供油系统仿真研究[J]. 车用发动机, 2005, 4(2): 23-25.  
QIU Tao, LIU Xing-hua. Simulation of the EUP fuel injection system[J]. Vehicle Engine, 2005, 4(2): 23-25. (in Chinese)
- [7] PÅR B, INGEMAR D. Diesel combustion with reduced nozzle orifice diameter[C/CD]//SAE. 2001-01-2010.
- [8] CHAUFOR P, MILLET G, HEDNA M, et al. Advanced modelling of a heavy-truck unit-injector system and its applications in the engine design process[C/CD]//SAE. 2004-01-0020.

## The IEUP Development on the Yunnei 4D44 Diesel Engine

QIU Tao<sup>1</sup>, LIU Xing-hua<sup>1</sup>, LIU Fu-shui<sup>1</sup>, FAN Bo-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Hong-guang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To meet the needs of diesel engine industry, an IEUP fuel injection system was developed. In the IEUP, multiple EUPs were integrated into one inline-pump body to replace the traditional inline-pump. Based on experiments, the IEUP inject performance with different pipe length and engine speed was discussed. The IEUP was applied to an YN4D44 diesel engine and the inject flow was optimized in this paper. Experiments prove that the optimized IEUP diesel is highly improved.

**Key words:** diesel; electronic unit pump(EUP); simulation; emission

(责任编辑 张 蕾)