

高压燃油系统电磁控制阀区域流动特性试验^{*}

仇滔 雷艳 彭璟 李旭初

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

【摘要】 研究了高压燃油系统单体泵电磁阀区域的流动特性。在电控单体泵泵体上设计了光学透视窗口,利用高速摄像仪器测量控制阀出口端的瞬态流动。对拍摄的图片进行灰度处理,获得了控制阀区域随时间变化的亮度曲线。分析试验结果得出:电控单体泵在控制阀区域出现空泡,形成两相流。由于高速燃油在狭小的控制阀区域流动,以及控制阀多次碰壁,挤压燃油导致空泡的产生。

关键词: 柴油机 单体泵 电磁阀 流动特性

中图分类号: TK427 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0007-04

Flow Characteristic Experiment of Solenoid Valve Region for High-pressure Fuel System

Qiu Tao Lei Yan Peng Jing Li Xuchu

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

The flow characteristics of solenoid valve region of electronic unit pump (EUP). EUP was rebuilt by using optical visualization observation. A diaphanous glass window was designed in the pump, and the transient flow in the solenoid valve outlet was observed by a high-speed camera. By gray processing of pictures, the brightness curve within the control valve region was acquired. Results showed that cavitation occurred in control valve of EUP and formed the two phase flow phenomenon. The formation of cavitation had two factors, one was due to flow region in control valve where high-speed fuel flow within was quiet narrow, another reason was that the control valve hit the baffle which caused vibration and impingement, hence the fuel was extruded.

Key words Diesel engine, Unit pump, Solenoid valve, Flow characteristic

引言

为了满足日益严格的排放法规和追求更低的油耗,燃油系统控制方式由机械式全面转变为电子控制方式,并且喷射压力不断提高,响应速度不断加快。

目前绝大部分电控高压燃油系统是通过电磁阀来调节控制阀的位置,进行高压燃油和低压燃油的导通或切断,从而实现燃油压力调节,实现喷射控制。为了提高响应速度,一般控制阀结构非常紧凑,

控制阀的流动面积尽量小。当控制阀打开,高压燃油需要在很短时间内通过很小的流通面积流入低压油路,由于控制阀口处一般存在突缩、突扩的结构,因此高压燃油系统控制阀附近的燃油流动非常复杂,经常产生漩涡、回流、脱壁和重新附壁等流动现象,存在着高强度湍流并可能气化,形成气液两相流。这必然影响高压燃油系统内其它位置的燃油特性,同时气泡的破裂将可能产生异常的作用力,影响控制阀的运动^[1]。两相流的存在还会影响控制阀区域的可靠性。所以必须重视高压和低压油路导通

收稿日期: 2011-12-06 修回日期: 2011-12-16

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51006012)

作者简介: 仇滔,副教授,博士,主要从事内燃机控制、柴油机燃油匹配研究, E-mail: qiutao@bjut.edu.cn

过程在控制阀区域产生的瞬态流动的特性研究。

高压差复杂截面下的流动一直是国内外研究的热点问题,针对以矿物油或者纯水为介质的液压锥阀阀口处的流场以及气穴现象等已进行了大量的研究工作^[2~4]。国内外对燃油系统的瞬态流场研究集中在电控喷油器嘴端的两相流方面。大量的研究表明喷油器区域出现两相流且其主要影响因素是喷油器的几何结构和流量系数。由于燃油系统控制阀区域液压阀口压差大、流速高、尺寸小,目前针对柴油机高压燃油系统的控制阀区域瞬变流动测试还未见报道。

空化流动是一种复杂的非定常多相紊流流动,包含了气相和液相的相互作用,形成随时间变化的复杂界面形状。通过光学摄影进行空化流场显示是研究此类现象的主要手段^[5]。通过高速摄影获得流场灰度照片,从照片提取到的亮度信息可间接反映出空化发展变化的强弱^[6],从而分析空化发生、发展和脱落的周期。

本文以电控单体泵为研究对象,通过在泵体上设计光学透视窗口,利用高速摄像仪器测量控制阀出口端的流动,开展对单体泵电磁阀区域瞬态流动特性的试验研究。

1 试验装置

1.1 单体泵

用于测量的改进单体泵如图 1 所示。为了能够观测到控制阀区域的流动,将单体泵的止推挡板和定位柱体改为丙烯酸甲酯有机玻璃^[5],定位柱体高度精密加工,以保证控制阀杆的位移。

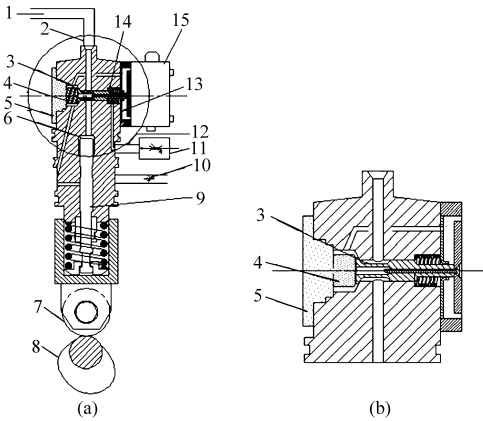


图 1 单体泵结构图

Fig. 1 Structure of unit pump system

(a) 整体图 (b) 放大图

1. 高压油管 2. 高压油路压力测试点 3. 电磁阀针阀 4. 可视挡板 5. 有机玻璃板 6. 高压腔 7. 挺柱滚轮 8. 凸轮 9. 泵柱塞 10. 止回阀 11. 压力调节阀 12. 低压油路压力测试点 13. 中间板 14. 电磁阀弹簧 15. 带线圈和磁芯的阀壳体

当线圈没有电流流过即没有驱动力时,电磁阀总是打开的。电磁阀弹簧作用力推动控制阀,使控制阀杆和泵体间形成一个流通通道。于是,泵内的高压和低压部分相互连通。在这个初始位置,燃油可以在高压油腔流入或流出。

单体泵的滚轮被凸轮顶起后,ECU 驱使线圈产生电流,从而产生电磁力吸合控制阀杆并克服弹簧力,使控制阀锥面和泵体接合。在这个密闭容积内,由于柱塞向上运动,高压腔内的燃油无法通过控制阀杆的端面流入低压油路而形成高压。

电磁阀断电,控制阀杆和泵体间的流通通道打开,高压油腔内的压力降低,喷油结束。因此,电控单体泵燃油系统的电磁铁通过吸合和断开控制阀杆来实现柱塞上部高压油腔和低压油路的通断,从而实现燃油控制。

1.2 光学可视系统

光学可视方法是目前观测流动最直接的方法,采用该方法可以精确地确定气泡产生的位置和变化,可对复杂流动进行研究。液压系统中的空化现象是在高流速、大压差的情况下出现的,一般都是在透明模型或通过窗孔对空化进行直接观察,通过拍摄记录空化图像。空化泡本身就是一种示踪粒子,对空化的观察可以判断出流场负压区和最低压力点的大致位置。这种方法不会受到初始条件的影响,通用性好。

用氙灯作为补光光源,功率为 120 W;使用的高速摄像机 Phantom v 7.3 是由美国 Vision Research 公司制造的 Phantom 系列高速数字摄像机,具体参数见表 1。

表 1 Phantom v 7.3 高速数字摄像机主要性能参数
Tab. 1 Main parameters of high-speed digital camera

参数	数值
图像深度/位	14
SR - CMOS 传感器分辨率/像素 × 像素	800 × 600
拍摄速度/kf · s ⁻¹	6.7 ~ 190
闪存容量/GB	24
图像输出方式	HD - SDI

1.3 试验系统

试验装置实物图如图 2 所示,原理图如图 3。

试验装置包括改装的单体泵、高速摄像机、氙灯和数据采集系统。试验台架为泰山金石 12PSDB 型油泵试验台。在凸轮轴上装一个正时齿盘确定凸轮轴的相位。摄像机拍摄的图像通过数据采集系统进行图像分析和后处理。然后图像自动保存到计算机里。



图 2 试验装置图
Fig. 2 Investigation system

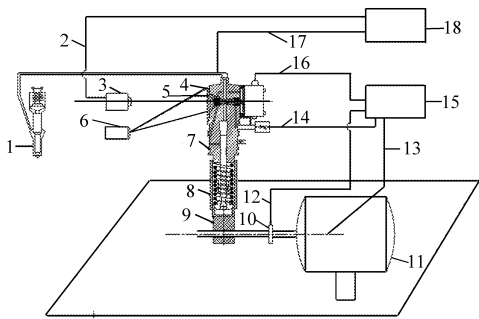


图 3 试验装置原理图
Fig. 3 Schematic of investigation

1. 喷嘴 2. 摄像机输出信号 3. 高速摄像机 4. 密封面 5. 挡板 6. 氙灯 7. 泵体 8. 挺杆 9. 凸轮 10. 正时齿盘 11. 电动机 12. 时间信号 13. 电动机控制信号 14. 低压油路压力数据信号 15. 电子控制系统 16. 电磁阀控制信号 17. 高压油路压力数据信号 18. 数据采集系统

高速摄像机设置为每 0.1 ms 拍摄一次,取控制阀开启时刻作为零时刻对拍摄图片进行定义,即 $T=0$ 。图 4 所示是以触发时刻为零点的驱动电流和驱动信号的关系。

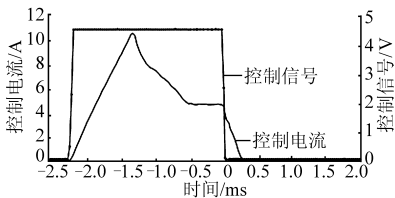


图 4 驱动及触发时刻
Fig. 4 Driver current and driver signal

通过调整电动机,保持电动机转速为 1 000 r/min,电磁阀驱动持续期为 10°CA 。

2 试验与结果分析

2.1 拍摄图片

图 5 是拍摄的控制阀区域的连续照片。如图 5 所示, $T=0.3\text{ ms}$ 时控制阀区域亮度出现变化,表明开始出现气穴; $T=0.9\text{ ms}$ 的图片发现阀端面出现针状亮度,这表明控制阀已经撞击到可视挡板上。 $T=5.0\text{ ms}$ 后的图片和 0 ms 时一致。

2.2 图片处理

将不喷油时不随时间改变的照片作为基准图片(图6a),然后以控制阀中心为中心,取燃油流动的

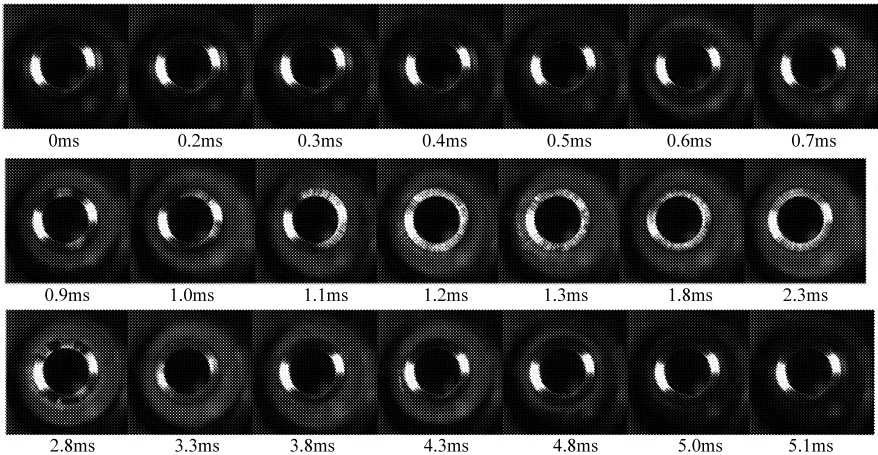


图 5 控制阀区域图片
Fig. 5 Images of control value

内径为有效区域的最小半径,取喷油时最亮光环的最外径作为有效区域的最大半径(图 6b)。

数字图像中各个像素所具有的明暗程度由灰度值所标识。将白色的灰度定义为 255,黑色灰度定义为 0,而由黑到白之间的明暗度均匀地划分为 256 个等级。对于黑白图像,每个像素用一个字节数据来表示,而在彩色图像中,每个像素需用 3 个字节数据来表示。彩色图像可以分解成红(R)、绿(G)、蓝(B)3 个单色图像,任何一种颜色都可以由这 3 种

颜色混合构成。将彩色图像转换为灰度图像,则先使用灰度变换公式

$$\text{inty} = r \times 0.3 + g \times 0.59 + b \times 0.11$$

然后,令 $r = g = b = y$ 即可读取黑白图像灰度值,即亮度值。

用区域内实际各像素点对应的亮度值总和除以设定区域假定为全白对应的灰度值总和则可以得到设定区域的亮度比例,该亮度比例正比于区域内气泡的数量,反映了空化的强弱程度。

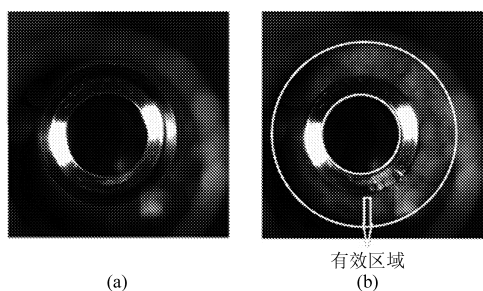


图6 参照图片

Fig. 6 Reference image

2.3 亮度分析

对照片经过处理后,得到控制阀区域在燃油喷射过程的亮度变化曲线,如图7所示。

由图7可以看出,燃油喷射结束后,随着控制阀

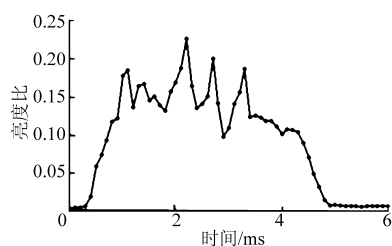


图7 喷油过程的亮度变化曲线

Fig. 7 Brightness change of valve process

的开启(开启时刻为 $T = 0.3 \text{ ms}$),高压燃油通过控制阀锥面回流到低压油路时,控制阀区域内空泡不断增加,说明此时由于高压燃油迅速流入低压油路,高速流动导致在该区域出现气化,形成空泡。当 $T = 0.9 \text{ ms}$ 时,由于控制阀碰到了光学挡板,碰壁产生了剧烈的气泡,这时空泡显著增加,由于惯性,控制阀在挡板附近出现多次振荡碰壁,一直到 $T = 5 \text{ ms}$ 的时间范围内,持续有空泡出现。因此,控制阀区域的空泡有两个形成因素:由控制阀狭小区域的高速流动导致;控制阀的多次碰壁,挤压燃油导致。

3 结论

(1)设计了一种测量控制阀区域流场的电控单体泵燃油系统试验装置,可以直观观测到控制阀区域燃油在喷射过程的特性变化。

(2)通过对拍摄得到的图片进行处理,得到控制阀区域燃油的亮度变化曲线。

(3)对试验结果进行分析,得出电控高压燃油系统的控制阀区域在高压油路和低压油路导通过程中将存在气液两相流,并分析了气泡形成的原因。

参 考 文 献

- 1 Hsieh T, Coldren D. Application of computational fluid dynamics for flow force optimization of a high pressure fuel injector spill valve[C]//International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition, SAE Paper 1999-01-1537. Dearborn, MI, USA, Session: Modelling in Diesel & SI Engines, 1999.
- 2 Ito Kazumi, Takahashi Koji, Inoue Kiyoshi. Flow in a poppet valve: computation of pressure distribution using a streamline coordinate system[J]. JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal Engineering, 1993, 36(1): 42~50.
- 3 高红,傅新,杨华勇,等. 锥阀阀口气穴流场的数值模拟与试验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 27~30.
Gao Hong, Fu Xin, Yang Huayong, et al. Numerical and experimental investigation of cavitating flow within hydraulic poppet valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 27~30. (in Chinese)
- 4 Oshima S, Leino T, Linjama M, et al. Experimental study on cavitation in water hydraulic poppet valve[J]. Transactions of the Japan Fluid Power System Society, 2002, 33(2): 29~35.
- 5 王国玉,曹树良,刘淑艳,等. 绕水翼超空化现象的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 606~608.
Wang Guoyu, Cao Shuliang, Liu Shuyan, et al. Experimental study of supercavitation phenomenon around a hydrofoil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 606~608. (in Chinese)
- 6 张敏弟,宋晓峰,王国玉,等. 空化流动图像处理程序设计及其应用[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(11): 983~986.
Zhang Mindi, Song Xiaofeng, Wang Guoyu, et al. Design and application of cavitation flow image programs[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(11): 983~986. (in Chinese)
- 7 Aljaz Osterman, Marko Hocesvar, Brane Sirok, et al. Characterization of incipient cavitation in axial valve by hydrophone and visualization[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(4): 620~629.
- 8 郑淑娟,权龙,陈青. 阀芯运动过程液压锥阀流场的 CFD 计算与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 168~172.
Zheng Shujuan, Quan Long, Chen Qing. Analysis and CFD simulation of the flow field in a moving poppet valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 168~172. (in Chinese)
- 9 Weber S T, Johnston D N, Edge K A. Flow visualization of a load control valve[C]//Proceedings of The 7th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP' 01, Linsheping, 2001: 87~102.
- 10 刘晓红,柯坚. 基于压力分布模式的液压阀空化噪声评价[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(2): 145~148.