

# 基于针阀升程的喷油泵试验台数字化量油

李东民<sup>1</sup>, 钟佩思<sup>1</sup>, 王会明<sup>2\*</sup>, 夏尚飞<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学机电学院, 青岛 266510; 2. 山东农业大学机电学院, 泰安 271018)

**摘要:** 为解决目前国内喷油泵试验台用量筒计量燃油误差较大的问题, 通过研究喷油器的喷油量与针阀升程、喷油时间、主轴转速、喷油压力等的关系, 推导出喷油量公式并计算出精确的喷油量, 经单片机处理进行数字显示。经验证试验表明: 由公式计算所得结果符合实际测量数值, 数字化量油方法可行。

**关键词:** 喷油泵试验台; 量油; 喷油量公式

中图分类号: S219.031

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0113-05

李东民, 钟佩思, 王会明, 等. 基于针阀升程的喷油泵试验台数字化量油[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 113-117.

Li Dongmin, Zhong Peisi, Wang Huiming, et al. Digital fuel measurement of fuel injection pump test bench based on needle valve lift [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 113-117.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

目前国内外柴油机喷油泵试验台量油系统普遍采用量筒式计量法, 该方法存在量筒的制造误差、沉积误差、液面读数误差等<sup>[1-6]</sup>, 使得测量精度较低。因此, 国内外相关研究机构采用容积法及流量法等方法对喷油泵试验台进行了改进, 提高了量油的自动化水平, 但仍存在小油量时的量油精度较低的问题, 已不能满足对汽车发动机的环保技术要求和节能要求。

本测试系统利用单片机技术、传感器技术和电子技术对原量油系统进行了智能化的技术改进, 自行设计了能够输出针阀升程波形曲线的磁感喷油器。通过对喷油器针阀升程波形曲线的研究, 推导精确的喷油量计算公式, 并将此公式编入单片机程序中。本文阐述了喷油量计算公式的推导过程并进行了公式验证。

## 1 测试系统总体设计

本测试系统利用传感器测取试验台不同主轴转速、不同喷油压力下的单次喷油的电信号, 经信号处理电路处理后送入单片机, 最终由显示器显示喷油量, 实现自动量油<sup>[7-9]</sup>。测试系统如图1所示。

### 1.1 试验设备及仪器

本研究的试验设备及仪器包括12PSDB110型喷油泵试验台、TDS2012型数字示波器、BH2 I型喷油泵(两缸I号泵)、霍尔转速传感器、自制的磁感喷油器、标准喷油器、直流电源、数字万用表等。BH2 I型喷油泵在各工况下的标定喷油量如表1所示。

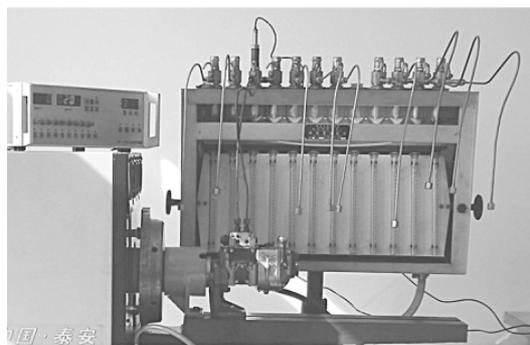


图1 喷油泵试验台量油测试系统

Fig.1 Fuel measurement system of fuel injection pump test bench

表1 BH2 I型喷油泵各工况下的标定喷油量

Table 1 Calibration injection quantity of BH2 I type fuel injection pump under different conditions

工况	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	油门开度	每200次标定油量/mL
起动	150	最大	13.2~17.2
怠速	300	最小	2.0~3.0
额定	700	最大	9.4~10.6
校正	1000	最大	8.6~9.1

### 1.2 磁感喷油器的磁敏元件与挺杆间隙的确定

量油信号由磁感喷油器通过采集针阀升程信号测定, 磁感喷油器由喷油器和磁敏元件组成。磁感喷油器的结构设计如图2所示, 它由喷油器和磁敏元件1组成。将磁敏元件1用连接套2固定在喷油器的尾端, 加长挺杆3的长度与磁敏元件1相对应。弹簧6的一端与调压螺母4相抵, 另一端与弹簧座5相抵, 弹簧的预紧力经挺杆作用在针阀7上<sup>[10-12]</sup>。工作中, 针阀的上下运动带动挺杆作同步运动, 使挺杆3顶端与磁敏元件1的间隙发生变化, 磁阻发生变化, 通过磁敏元件线圈的磁场发生变化, 线圈中产生感应电动势, 磁感喷油器输出电信号。

一般喷油器针阀升程范围为0.2~1.0 mm, 而磁感喷油器的磁敏元件的最大检测距离为2.0 mm, 因此磁敏元

收稿日期: 2007-11-19 修订日期: 2008-04-29

作者简介: 李东民(1977-), 男, 泰安人, 博士生, 研究方向: 并行工程与虚拟制造技术、企业信息化。青岛 山东科技大学机电学院, 266510。Email: lidongmin8483@sohu.com

\*通讯作者: 王会明, 男, 教授, 主要从事汽车节能与检测研究。泰安 山东农业大学机电学院, 271018。Email: whm@sdau.edu.cn

件与挺杆间隙应在 1.0~3.0 mm 范围内调整。通过试验分别测定并比较间隙为 1.5、2.0、2.5 mm 时的信号波形，结果表明：磁敏元件与挺杆的间隙 2.0 mm 为最佳。

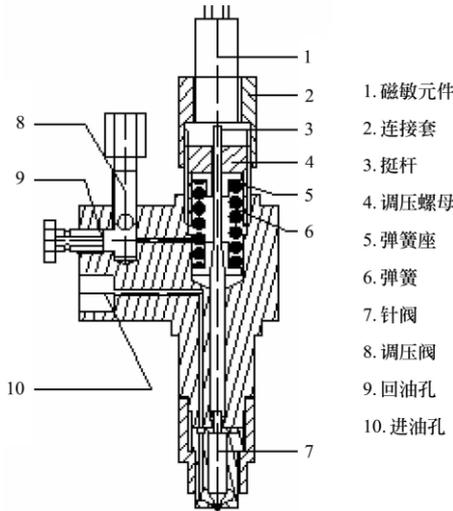


图 2 磁感喷油器  
Fig.2 Magnetism sense fuel injector

### 1.3 曲线模型的建立

喷油量的影响因素有：针阀升程、喷油时间、主轴转速、喷油压力等，通过测定起动油量、怠速油量、额定油量以及校正油量与上述因素的关系，推导出喷油量的计算公式。

单次喷油量计算公式是根据磁感喷油器输出电信号的波形（如图 3 所示）推导的，该波形即为针阀运动曲线。单个周期的波形曲线对横坐标的积分值即为波形曲线与该周期两端点处的竖直线以及横坐标所围成的面积，将其表示为  $Q$ 。由喷油规律可知，该积分面积  $Q$  与单次喷油量相对应<sup>[13-16]</sup>。波形纵坐标所示电压值  $U$  与针阀升程对应，横坐标所示时间值  $t$  与喷油时间相对应，因此，积分面积  $Q$  可由输出信号电压值  $U$  以及单次喷油时间  $t$  确定。

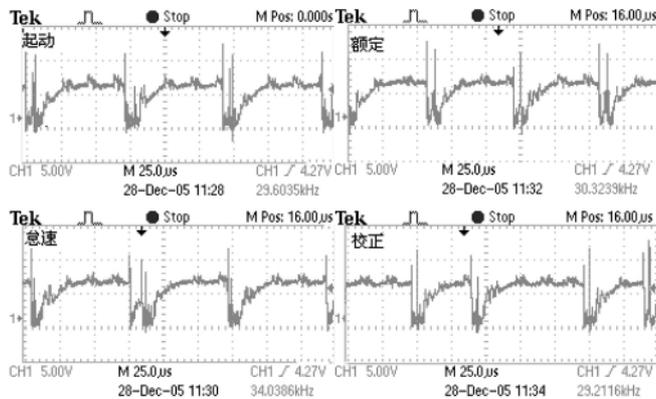


图 3 12.5 MPa 各工况波形  
Fig.3 Waveforms of different conditions under 12.5 MPa

总喷油量计算公式推导步骤为：

1) 采集针阀运动曲线的数据点，利用 EXCEL 回归建立曲线的数学模型。

2) 计算各工况单个周期的积分面积  $Q$ ，确定积分面积  $Q$  与单次喷油量  $l$  的关系式  $l=K_1 \times Q$ （其中  $K_1$  为比例系数）。

3) 确定各工况下的积分面积  $Q$  与电压值  $U$  和单次喷油时间  $t$  的函数关系式  $Q=K_2 \times U \times t$ （其中  $K_2$  为比例系数）。

4) 确定单次喷油量计算公式： $l=K_1 \times Q=K_1 \times K_2 \times U \times t$ 。最后，得到总喷油量计算公式为： $L=K \times C \times l$ （其中  $K$  为总修正系数； $C$  为喷油次数，一般取  $C=200$  次的喷油量作为试验油量）。

#### 1.3.1 针阀升程信号的采集

试验测定喷油压力分别为 12.5、16.0、17.5 MPa 的起动、怠速、额定、校正工况下的针阀升程波形。其中，12.5、17.5 MPa 各工况下的波形分别如图 3、图 4 所示。

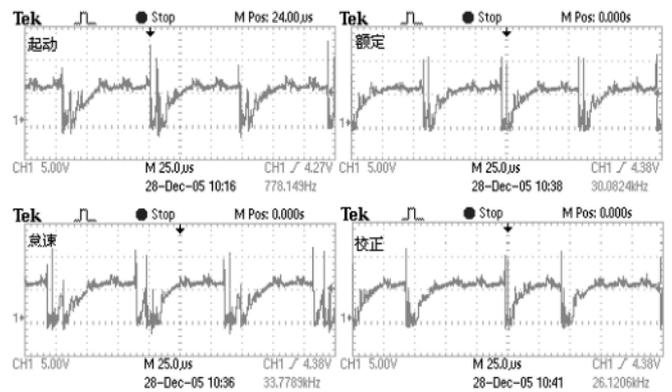


图 4 17.5 MPa 各工况波形  
Fig.4 Waveforms of different conditions under 17.5 MPa

#### 1.3.2 曲线模型的建立

采集各工况波形的数据点，利用 EXCEL 进行回归分析，根据波形曲线的趋势线建立曲线模型。选取喷油压力为 17.5 MPa 时波形的回归曲线为例（如图 5 所示），由回归曲线得到其趋势线，根据相关系数  $R^2$  值判别趋势线与实际曲线的拟合度，将拟合度高的趋势线函数式作为磁感喷油器输出信号波形曲线的函数关系式。

### 2 喷油量计算公式的推导

#### 2.1 单次喷油量与曲线积分面积的关系

由所得曲线模型，计算波形曲线各工况下的单个周期积分面积  $Q$ ；根据试验测得 200 次喷油量计算出单次喷油量  $l$ ，推导各工况下积分面积  $Q$  与单次喷油量  $l$  的关系<sup>[17-20]</sup>。为减少试验误差，每个工况下各进行 3 次重复试验，取 3 次试验结果的平均值。

1)  $Q$  值的计算

17.5 MPa 工况下的积分面积  $Q$  计算过程如下：

起动工况 1：

$$Q_1 = \int_2^{80} (-0.003x^2 + 0.2741x - 0.5623) dx = 320.7204$$

起动工况 2：

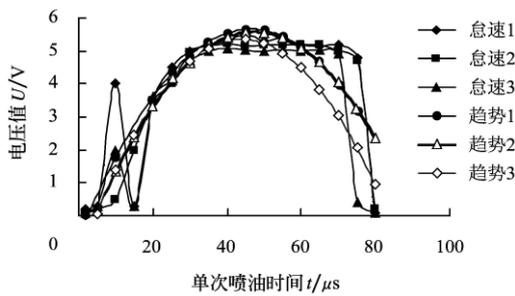
$$Q_2 = \int_2^{80} (-0.0031x^2 + 0.2891x - 1.2587) dx$$

$$= 297.3048$$

起动工况 3:

$$Q_3 = \int_2^{80} (-0.0034x^2 + 0.3024x - 1.2949) dx$$

$$= 285.8154$$



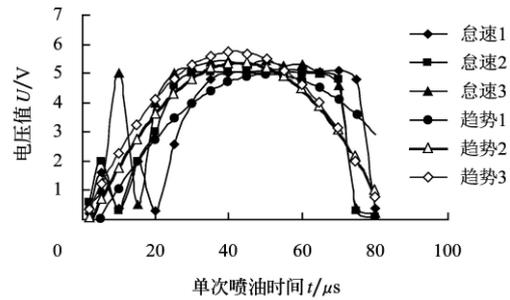
a. 起动工况

同理可得怠速、额定、校正工况下的积分面积  $Q$ ，结果如表 2 所示。

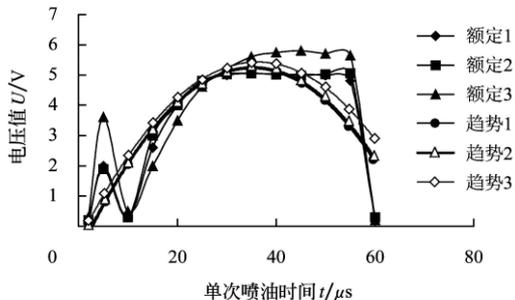
表 2 积分面积  $Q$  值计算结果

Table 2 Calculation results of integral area  $Q$

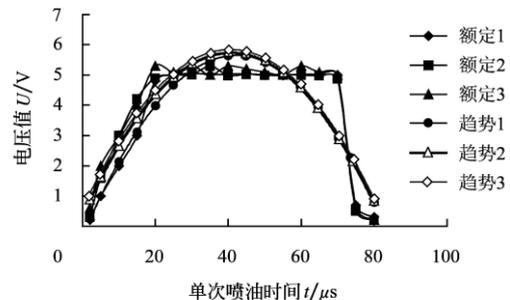
$Q$ 值	起动	怠速	额定	校正
$Q_1$	320.7204	285.2226	216.77115	322.2726
$Q_2$	297.3048	282.8748	221.8713	328.3644
$Q_3$	285.8154	312.7878	236.292	330.018
平均值	301.2802	293.6284	224.97815	326.885



b. 怠速工况



c. 额定工况



d. 校正工况

图 5 17.5 MPa 各工况回归曲线

Fig.5 Regression curves of different conditions under 17.5 MPa

2) 积分面积与单次喷油量的关系

17.5 MPa 工况下  $Q$  与  $l$  的关系推导过程如下: 起动工况的单次喷油量:  $l = 0.0823$  mL。单位面积所代表的喷油量:  $l/Q = 0.0823/301.2802 = 2.732 \times 10^{-4}$  mL。同理可得怠速、额定、校正工况的  $l/Q$  值。各工况的  $l/Q$  值计算结果如表 3 所示。

表 3 单位面积所代表的喷油量  $l/Q$  值计算结果

Table 3 Calculation results of  $l/Q$  /mL

$l/Q$ ( $\times 10^{-4}$ )	工况				
	起动	怠速	额定	校正	
油压 /MPa	12.5	2.629	0.677	1.967	1.493
	16.0	3.135	0.531	2.162	1.482
	17.5	2.732	0.50	2.147	1.407

定义系数  $K_1 = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (l_i / Q_i)$ ，其中  $n=3$  表示试验次数，各工况下  $K_1$  值的计算结果如表 4 所示。

2.2 积分面积与曲线电压值及喷油时间的关系

由喷油规律知<sup>[21,22]</sup>，波形曲线的积分面积  $Q$  与波形电压值  $U$  和单次喷油时间  $t$  的函数关系为  $Q=K_2 \times U \times t$  ( $K_2$

表 4  $K_1$  值计算结果

Table 4 Calculation results of  $K_1$

$K_1$ ( $\times 10^{-4}$ )	工况				
	起动	怠速	额定	校正	
油压 /MPa	12.5	2.914	0.761	1.088	1.456
	16.0	3.135	0.531	2.162	1.482
	17.5	2.694	0.514	2.166	1.278

为比例系数)，因此  $K_2=Q/(U \times t)$ ，即系数  $K_2$  可由积分面积  $Q$ 、波形电压值  $U$ 、喷油时间  $t$  计算得出。

17.5 MPa 起动工况下系数  $K_2$  的计算过程为:  $K_2 = 301.2802 / (5 \times 35) = 1.7216$ 。

同理可计算得出怠速、额定、校正工况的  $K_2$  值。各工况下  $K_2$  值计算结果如表 5 所示。

表 5  $K_2$  值计算结果

Table 5 Calculation results of  $K_2$

$K_2$	工况				
	起动	怠速	额定	校正	
油压 /MPa	12.5	1.601	1.073	1.366	1.061
	16.0	1.160	1.412	0.971	0.931
	17.5	1.722	1.678	0.90	1.189

2.3 总修正系数及总喷油量公式的确定

单次喷油量  $l=K_1 \times Q=K_1 \times K_2 \times U \times t$ , 总喷油量计算公式为:  $L=C \times l=C \times K_1 \times K_2 \times U \times t=C \times K \times U \times t$ ,  $K$  值计算结果如表 6 所示。

表 6  $K$  值计算结果  
Table 6 Calculation results of  $K$

$K (\times 10^{-4})$	工 况			
	起动	怠速	额定	校正
油压 /MPa				
12.5	4.665314	0.816553	1.486208	1.544816
16.0	3.6366	0.749772	2.099302	1.379742
17.5	4.639068	0.862492	1.9494	1.519542

3 公式的验证与误差的比较

3.1 公式的验证

取 12.5、16.0、17.5 MPa 中任一喷油压力的各工况的试验所得针阀升程波形, 如图 6 所示为 17.5 MPa 下各工况的针阀升程波形, 利用喷油量公式计算喷油量, 验证公式的正确性。

1) 起动工况: 由波形图测得  $U=5.2 \text{ V}$ ,  $t=32 \mu\text{s}$ ,  $C=200$ , 由公式  $L=C \times K \times U \times t$  计算可得  $L=15.4 \text{ mL}$ , 标定值范围为 13.2~17.2 mL;

2) 怠速工况: 由波形图测得  $U=5.1 \text{ V}$ ,  $t=33 \mu\text{s}$ ,  $C=200$ , 由公式  $L=C \times K \times U \times t$  计算可得  $L=2.9 \text{ mL}$ , 标定值范围为 2.0~3.0 mL;

3) 额定工况: 由波形图测得  $U=5.5 \text{ V}$ ,  $t=45 \mu\text{s}$ ,  $C=200$ , 由公式  $L=C \times K \times U \times t$  计算可得  $L=9.6 \text{ mL}$ , 标定值范围

为 9.4~10.6 mL;

4) 校正工况: 由波形图测得  $U=5.0 \text{ V}$ ,  $t=58 \mu\text{s}$ ,  $C=200$ , 由公式  $L=C \times K \times U \times t$  计算可得  $L=8.8 \text{ mL}$ , 标定值范围为 8.6~9.1 mL。

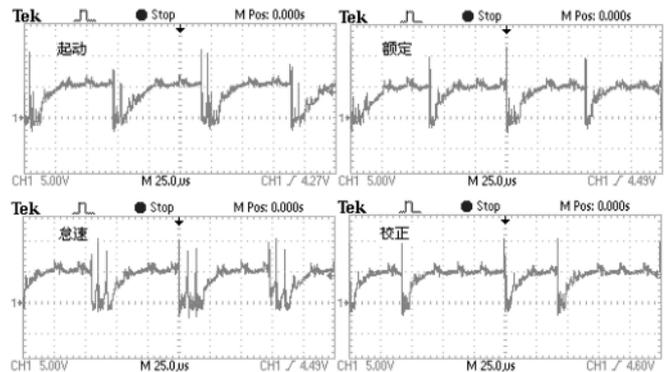


图 6 17.5 MPa 各工况波形

Fig.6 Waveforms of different conditions under 17.5 MPa

3.2 误差的比较

在标定喷油压力 17.5 MPa 下, 同时对该量油系统与采用行业标准喷油器的喷油泵试验台量油系统在各工况下进行 10 次量油试验, 所得量油数据及相对误差如表 7 所示。相对误差计算公式为:

$$\delta_L = \frac{\Delta L}{\bar{M}} \times 100\%$$

式中  $\bar{M}$  ——算术平均值;  $\Delta L$  ——算术平均值极限误差。

表 7 两种量油系统各工况量油试验

Table 7 Fuel measurement test of two fuel measurement systems

工况	量油系统	起动油量/ mL										误差 /%
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
起动工况	本研究	16.66	16.53	16.64	16.96	16.55	16.61	16.43	16.83	16.51	16.78	0.93
	标准	16.3	16.4	16.7	17.2	16.6	17.0	16.3	17.2	16.5	16.7	1.94
怠速工况	本研究	2.36	2.38	2.34	2.37	2.33	2.39	2.32	2.35	2.36	2.32	0.98
	标准	2.4	2.2	2.5	2.7	2.3	2.4	2.5	2.2	2.4	2.6	6.35
额定工况	本研究	10.11	9.83	10.08	10.13	10.05	9.95	10.06	9.88	9.97	10.04	0.94
	标准	10.6	9.7	10.6	10.2	10.6	9.8	10.1	9.6	9.8	10.1	3.63
校正工况	本研究	8.85	8.76	8.86	8.75	8.82	8.78	8.96	8.77	8.89	8.95	0.82
	标准	9.0	8.7	8.9	8.6	8.9	8.7	9.0	8.9	9.1	9.0	1.73

4 结 论

通过对公式的验证及表 7 所得数据和相对误差的比较可看出: 通过喷油量公式计算所得结果符合表 1 所示的标定值的范围, 其相对误差小于标准量油系统所测油量值的相对误差, 因此, 该喷油量计算公式是正确的, 数字化量油方法可行。

[参 考 文 献]

[1] 刘庆松. 简述柴油机喷油泵试验台的原理和发展[J]. 山东内燃机, 2001, (2): 6-7.

[2] 师帅兵, 陈大林, 朱俊平. 喷油泵试验台微机控制系统设计[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 173-176.  
 [3] 娄国焕, 王福斌. 智能喷油泵试验台的研制[J]. 机床电器, 1997, (2): 31-32.  
 [4] 王会明, 侯加林, 赵忠华. 喷油泵试验台自动量油系统的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 37-39.  
 [5] 陈至坤, 马晓峰. 喷油泵试验台控制装置的研制[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 476-478.  
 [6] 赵忠华, 王会明, 侯加林. 车用柴油机喷油泵实验台自动量油系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(3): 316-319.  
 [7] 朱余清, 吴伟斌, 洪添胜. 基于虚拟仪器的柴油机喷油量

- 模糊控制系统[J]. 微计算机信息, 2006, 22(7): 24-26.
- [8] 李 涛, 刘跃敏, 王新勇, 等. 工控机在喷油泵试验台中的应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 21-23.
- [9] 汪 云. 发动机喷油量的计算[J]. 内燃机, 2005, (1): 22-24.
- [10] 高连兴, 吴 明, 王会明. 拖拉机与汽车[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 82-115.
- [11] 李东民, 王会明, 赵忠华. 改进喷油泵试验台量油系统的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2006, (2): 76-77.
- [12] 董 辉. 汽车电子技术与传感器[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 259-280.
- [13] 李东民. 改进喷油泵试验台量油系统的研究[D]. 山东: 山东农业大学, 2006.
- [14] 贾锡印, 田忠魁. 柴油机燃油喷射系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 74-87.
- [15] 刘胜吉, 王 建, 于子冬, 等. 小缸径涡流室柴油机用喷油嘴的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 124-127.
- [16] 赵洪学, 陈兆坤. 喷油器及其流量控制[J]. 现代车用动力, 2002, (4): 34-37.
- [17] 王 忠, 黄兆春, 王 林, 等. 降低柴油机排放的多因素匹配试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 120-124.
- [18] 朱访君, 陈特奎, 吴 坚, 等. 柴油机采用轻量针阀喷油器的节油研究[J]. 内燃机工程, 1994, 15(4): 63-67.
- [19] 金振华, 黄开胜, 卢青春, 等. 柴油机喷油泵试验台性能测试系统开发[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1861-1864.
- [20] 陈生春, 林瑞霖, 倪庆棋. 光纤位移传感器在喷油器针阀升程测量中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(5): 53-56.
- [21] 刘建敏, 乔新勇, 张小明. 基于人工神经网络的柴油机喷油量检测研究[J]. 内燃机工程, 2002, 23(2): 51-53.
- [22] 王会明, 景淑红, 侯加林, 等. 便携式小型拖拉机功率油耗仪的研制[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 85-89.

## Digital fuel measurement of fuel injection pump test bench based on needle valve lift

Li Dongmin<sup>1</sup>, Zhong Peisi<sup>1</sup>, Wang Huiming<sup>2\*</sup>, Xia Shangfei<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** To reduce the fuel measurement errors by measuring cylinder, formula of fuel injection quantity was got and the quantity of fuel injection was attained and displayed by studying the relationships between needle valve lift, time of fuel injection, spindle speed and injection pressure etc. Verification experiments show that the results derived from the formula of fuel injection quantity is in accord with the actual fuel quantity and the digital fuel quantity measurement is feasible.

**Key words:** fuel injection pump test bench; fuel measurement; formula of fuel injection quantity