

共轨柴油机基于瞬时轨压波形特征参数的 喷油量观测方法

凌 健, 谢 辉

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Observation of Fuel Injection Quantity Based on Characteristic Parameters of Instantaneous Rail Pressure Waveforms for Common Rail Diesel Engines

LING Jian, XIE Hui

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To precisely reveal the relation between fuel injection quantity and characteristic parameters defined from the fluctuation law of instantaneous rail pressure of high pressure common rail fuel injection system of diesel engines, a fuel injection quantity observation (IQO) method was proposed based on the characteristic parameters of instantaneous rail pressure waveforms. With this method, the instantaneous rail pressure waveforms were divided into a series of typical segments. Four characteristic points and four characteristic segments were defined to describe the instantaneous rail pressure fluctuation characteristics of each cylinder. And ten characteristic parameters were defined to evaluate the instantaneous rail pressure fluctuation characteristics in the fuel injection process of each cylinder. A database of the characteristics of rail pressure waveform groups was set up and the fluctuation law of the instantaneous rail pressure under different operating conditions was revealed by mean processing of the characteristic parameters of the instantaneous rail pressure fluctuation at every steady experimental operating point. An IQO model was established by the fuel continuity equations, and calibrated by the parameter identification and offline validation with the characteristics database of rail pressure waveform groups. The results show that the IQO model has simple structure and high observation accuracy and it lays a good foundation for further engineering application in electronic control unit (ECU).

摘要: 为了揭示柴油机高压共轨燃油喷射系统中瞬时轨压波动规律及其特征参数与喷油量的关系,提出了一种基于瞬时轨压波形特征参数的喷油量观测方法。将瞬时轨压波形划分成一系列典型片段,采用 4 个特征点和 4 个特征段来描述每缸瞬时轨压波动特征,并用 10 个特征参数来评价每缸喷油过程的瞬时轨压波动特征。对各稳态试验工况点瞬时轨压波动特征参数均值化处理后,建立了轨压波形群特征数据库,并揭示了不同工况下瞬时轨压波动规律。基于燃油连续性方程,构建了喷油量观测模型,利用轨压波形群特征数据库对喷油量观测模型进行参数辨识和离线验证。结果表明:该喷油量观测模型结构简单,观测精度高,为在电控单元中的应用奠定了基础。

关键词: 内燃机;柴油机;高压共轨;轨压;特征参数;喷油量观测

Key words: IC engine; diesel engine; high pressure common rail; rail pressure;

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划项目(2012AA111706);国家自然科学基金项目(51307119)

作者简介: 凌 健(1986—),男,博士,主要研究方向为发动机控制策略设计与开发, E-mail: lingjian@tju.edu.cn;

谢 辉(联系人), E-mail: xiehui@tju.edu.cn.

characteristic parameter;fuel injection quantity observation

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.01.011

中图分类号: TK421.4 文献标识码: A

0 概述

高压共轨燃油喷射系统能够柔性控制喷油参数,有效降低柴油机排放,显著提高柴油机动力性和燃油经济性,是实现柴油机节能减排的关键技术之一。在高压共轨燃油喷射系统中,轨压不仅决定喷射压力的高低,而且还是燃油计量的重要参数,轨压波动直接影响喷射压力、喷油量及喷油速率等关键参数的变化^[1-2],造成实际喷油量与目标喷油量不一致^[3]。

喷油量是关键的喷油参数,研究瞬时轨压波动的基本特征及其与喷油量之间的特征规律很有必要^[4],具备重要的工程实际应用价值。近年来大量研究工作集中于共轨系统建模与仿真分析^[5-6]、轨压波动传递特性分析及对排放性能的影响^[7-9]和轨压预测模型及控制算法设计^[10-12],然而从轨压波动特征规律角度出发建立喷油量观测方法来揭示瞬时轨压波形规律与喷油量的关系鲜有研究。

在高压共轨柴油机中,发动机电控单元(ECU)对喷油量的控制是以固定脉谱图形式设计,而喷油过程瞬时轨压波动、喷油器驱动电流不足、喷油器喷孔阻塞及喷油器老化等因素都会造成实际喷油量不准。高压油泵泵油事件和喷油器喷油事件都会引起瞬时轨压波动,丰富的供油和喷油特征信息都蕴藏在瞬时轨压波形中。

为此,本文尝试探索研究柴油机高压共轨燃油喷射系统中瞬时轨压波动规律,并用于探索建立瞬时轨压波形特征参数与喷油参数关系的喷油量观测模型。首先,基于发动机台架试验数据建立轨压波形群基础数据库;然后,划分典型轨压波形片段,并定义轨压波形特征点和特征参数来描述瞬时轨压波动特征规律,建立轨压波形群特征数据库;最后,基于燃油连续性方程,构建喷油量观测模型,并用试验数据辨识该模型的系数和验证该模型的观测精度。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验在一台车用 6 缸高压共轨柴油机上开展,采用基于英飞凌 32 位 TC1766 单片机为主芯片的自主高压共轨柴油机控制器(TJU-CR-ECU)实现发动机控制,利用湘仪 FC2000 测控系统控制发动机的转速与负荷,并利用湘仪 FC2212L 瞬态油耗仪测量

发动机油耗数据。其中,柴油机的主要技术参数如表 1 所示。高压共轨燃油喷射系统的主要技术参数如表 2 所示。

表 1 柴油机参数

项目	参数
型式	直列、水冷、增压、中冷
缸数	6
排量/L	11.596
最大功率/kW	353(2 100 r/min)
最大扭矩/(N·m)	1 973(1 200~1 500 r/min)

表 2 高压共轨燃油喷射系统参数

项目	参数
燃油喷射系统	BOSCH 第 2 代共轨喷射系统
最高压力/MPa	160
喷孔数目	8
喷孔直径/mm	0.217
喷雾锥角/(°)	143
流量特性/(L·min ⁻¹)	2.018~2.102(10 MPa)

图 1 为高压共轨柴油机试验装置示意图。本研究利用 Yokogawa DL9140 数字示波器以 6.25 MHz 采样频率实时采集轨压传感器信号、曲轴位置传感器信号、凸轮轴位置传感器信号和喷油器驱动电流信号的数据,并以 Ethernet 将数据同步发送到上位机;同时,利用 CANape 基于 CCP 通讯协议实时监控与标定自主 ECU 中的发动机运转数据。

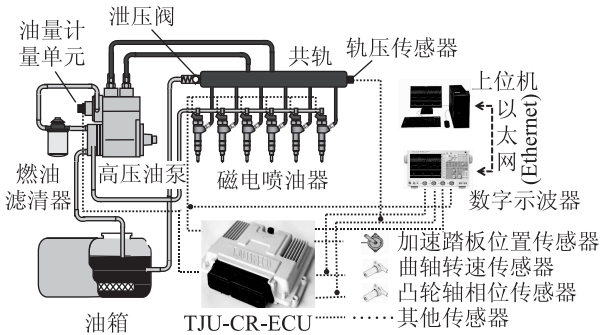


图 1 高压共轨柴油机试验装置示意图

1.2 试验方法

考虑到多次喷射模式下轨压波动比较剧烈和复杂,本文仅探索研究该柴油机高压共轨燃油喷射系统在单次喷射模式及常用工况下的瞬时轨压波动规律,并用于探索建立瞬时轨压波形特征参数与喷油

参数关系的喷油量观测方法。以该柴油机常用工况为参考基准,采用均布法设计稳态多工况试验,分别调节发动机平均转速、平均轨压、喷油正时和喷油脉宽,使试验点均匀覆盖该柴油机常用工况,共有 195 个稳态试验工况点,如表 3 所示,工况点依次顺序编号。

表 3 稳态试验工况点

平均转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	平均轨压/ MPa	喷油正时/ ($^{\circ}$)	喷油脉宽/ms
600	60	-6	0.8,1.0,1.2,1.5,1.8
600	100	-6,-8	0.8,1.0,1.2,1.5
600	120,140	-6	0.8,1.0,1.2
800	60	-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5, 1.8,2.0,2.2
800	100	-4,-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5,1.8
800	120,140	-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5
1 200	60	-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5, 1.8,2.0,2.2
1 200	100	-4,-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5
1 200	120,140	-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2
1 600	60	-6,-8,-10	0.8,1.0,1.2,1.5, 1.8,2.0,2.2
1 600	100	-8	0.6,0.8,1.0,1.2,1.5
1 600	120,140	-8	0.6,0.8,1.0,1.2
1 900	100	-8,-10	0.6,0.8,1.0,1.2,1.5
1 900	60,120,140	-10	0.8,1.0,1.2,1.5

2 喷油量观测器设计

2.1 喷油量观测器的基本架构

图 2 为建立的喷油量观测器基本结构图。首先,针对表 3 中每个稳态试验工况点高速采集 1 000 个发动机工作循环以上的瞬时轨压信号、喷油器驱动电流信号、曲轴电压信号及凸轮轴电压信号数据,利用低通滤波器对采集信号滤波处理后,利用曲轴信号和凸轮轴信号建立发动机相位同步机制,得到基于曲轴转角域的循环参数,建立轨压波形群基础数据库;然后,将瞬时轨压波形循环参数按照各缸供油过程和喷油过程划分成典型片段,并定义轨压波形典型片段特征点和特征段,提取出每循环每缸对应的轨压波形特征参数;对该 1 000 个发动机循环波形特征参数取平均,得到各稳态工况下每缸的平均特征参数及 6 个缸的循环平均特征参数,建立轨压波形群特征数据库;最后,基于燃油连续性方程建立喷油量观测模型,并利用轨压波形群特征数据库和发动机运行参数对该喷油量观测模型进行模型参数辨识和模型离线验证。

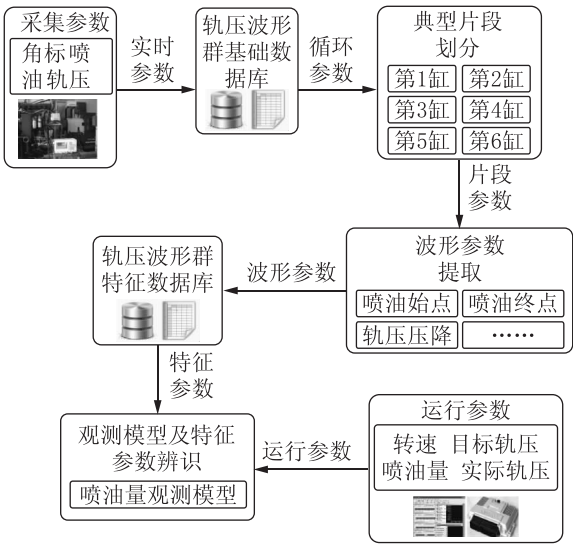


图 2 喷油量观测器基本结构图

2.2 轨压波形特征参数定义

发动机属于旋转系统且具备周期性,因此采用曲轴转角作为基准轴,将信号由时域变为曲轴转角域分析。图 3 为转速 1 900 r/min、平均轨压 120 MPa、喷油脉宽 0.8 ms、喷油正时 -10° 曲轴转角工况下一个发动机工作循环内的瞬时轨压波形。

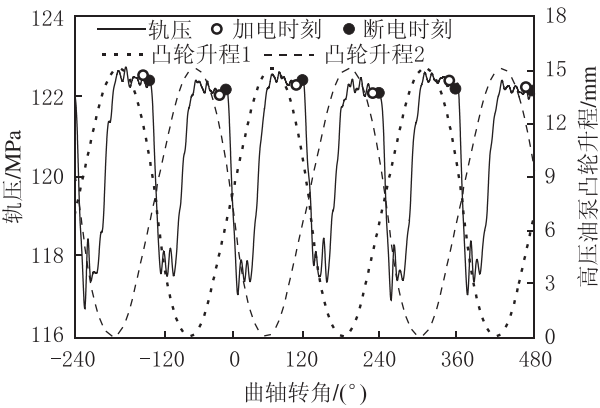


图 3 一个发动机工作循环内的瞬时轨压波形

高压油泵凸轮轴推动其柱塞压缩燃油进入共轨管中,引起轨压上升,当柱塞达到上止点(即供油终点)时,停止往共轨管中供油;轨压停止升高,在内部泄漏和脉动作用下,维持一定轨压波动;随后 ECU 对喷油器进行加电,受到喷油正时(即加电时刻)和喷油脉宽作用,经过一段机电液延迟,高压燃油由喷油器喷入气缸,引起轨压下降,直至喷油器关闭;轨压停止下降,在内部泄漏和脉动作用下,维持一定轨压波动。如此往复交替进行。

图 4 为从图 3 所示轨压波形中提取出的第 1 缸轨压波形典型片段。将单个气缸的轨压波形典型片段划分为轨压压升段、轨压波峰段、轨压压降段和轨压波谷段 4 个特征段,采用轨压压升始点 RPRS、轨

压压升终点 RPRE、轨压压降始点 RPFS 和轨压压降终点 RPFE 4 个特征点来描述轨压波动特征。利用瞬时轨压压降特征点的角度、轨压偏差及变化率共计 10 个波形参数和 2 个工况参数来评价轨压波动特征,建立轨压波形群特征数据库,如表 4 所示。

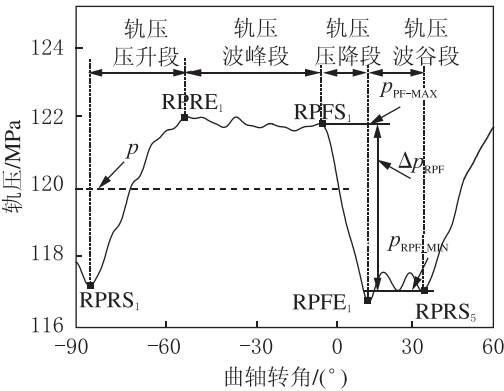


图 4 轨压波形典型片段波动特征图

表 4 轨压波形典型片段中特征参数表

特征参数	定义	描述
θ_{RPFS}	轨压压降始点角度	瞬时轨压压降始点对应的曲轴转角
p_{RPFS}	轨压压降始点轨压	瞬时轨压压降始点对应的轨压偏差
θ_{RPFE}	轨压压降终点角度	瞬时轨压压降终点对应的曲轴转角
p_{RPFE}	轨压压降终点轨压	瞬时轨压压降终点对应的轨压偏差
$\Delta\theta_{RPFF} = \theta_{RPFE} - \theta_{RPFS}$	轨压压降段角度偏差	瞬时轨压压降段对应的曲轴转角之差
$\Delta p_{RPFF} = p_{RPFE} - p_{RPFS}$	轨压压降段轨压偏差	瞬时轨压压降段对应的轨压偏差之差
$d p_{RPFF} = \Delta p_{RPFF} / \Delta \theta_{RPFF}$	轨压压降段轨压变化率	瞬时轨压压降段对应的轨压压降变化率
p_{RPF_MAX}	轨压压降峰值	喷油过程对应的瞬时峰值轨压平均值
p_{RPF_MIN}	轨压压降谷值	喷油过程对应的瞬时谷值轨压平均值
$\Delta p_{RPF} = p_{RPF_MAX} - p_{RPF_MIN}$	轨压压降	喷油过程对应的瞬时轨压压降平均值
n	平均转速	一个发动机工作循环内对应的平均转速
p	平均轨压	一个发动机工作循环内对应的平均轨压

2.3 轨压波形特征参数提取

为喷油量观测器在 ECU 中实际应用做准备,模拟 ECU 建立轨压信号采集处理算法和轨压波形特征参数提取算法,对轨压波形群基础数据库中瞬时轨压信号进行二次采样提取,并建立轨压波形群特征数据库。轨压传感器的响应时间为 200 ~

800 μs ^[13],根据香农采样定理,轨压传感器信号的采样频率应在 1 kHz 以上。由于发动机正常工作在 600~2 100 r/min 转速范围内,对应轨压传感器信号的采样频率应在 3.6°曲轴转角以内,故选定轨压传感器信号的采样频率为 1°曲轴转角。

图 5 为轨压传感器信号采样处理过程。首先,对轨压采样信号进行低通滤波处理,并设置喷油过程采样窗口为喷油器加电时刻(即喷油正时)到上止点后 30°;然后,经 1°曲轴转角定周期采样,送入缓冲存储器;最后,提取出 5 个最高轨压经过切尾均值处理作为轨压压降峰值 p_{RPF_MAX} ,提取出 5 个最低轨压经过切尾均值处理作为轨压压降谷值 p_{RPF_MIN} ,再根据 p_{RPF_MAX} 和 p_{RPF_MIN} 求得轨压压降 Δp_{RPF} 。

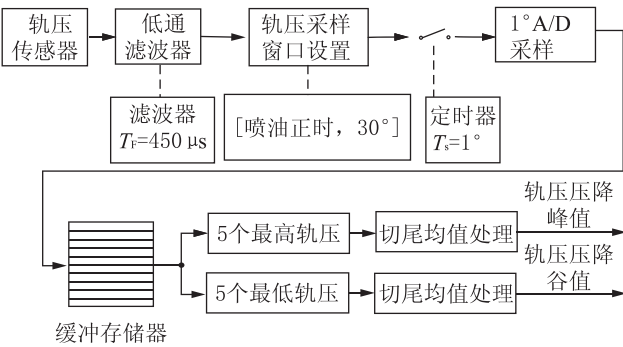


图 5 轨压传感器信号采样处理过程示意图

2.4 特征参数变化规律分析

由于共轨系统各缸喷油控制参数一致,而试验在 6 缸柴油机中进行,且试验测量的油耗为柴油机平均油耗,故本文研究 6 缸平均的瞬时轨压波动特征规律及其与喷油量的关系。

由于喷油量由轨压和喷油脉宽共同决定,为了分析瞬时轨压波形特征参数与喷油量的关系,首先固定平均转速为 1 200 r/min、喷油正时为 -8°(本文中用负值表示上止点前曲轴转角)、平均轨压为 60 MPa,调节喷油脉宽分别别 0.8、1.0、1.2、1.5、1.8、2.0 和 2.2 ms。图 6 为不同喷油脉宽对应的特征参数变化规律。

由图 6 可知,当平均转速、喷油正时和平均轨压不变时,随着喷油脉宽变大,喷油量和瞬时轨压压降增加,造成轨压波动变大,且喷油量与瞬时轨压压降的单调性一致。

为了从另外一个角度来分析瞬时轨压波形特征参数与喷油量的关系,固定平均转速为 1 200 r/min、喷油正时为 -8°、喷油脉宽为 1.0 ms,调节平均共轨分别为 60、100、120 和 140 MPa,图 7 为不同平均轨压对应的特征参数变化规律。

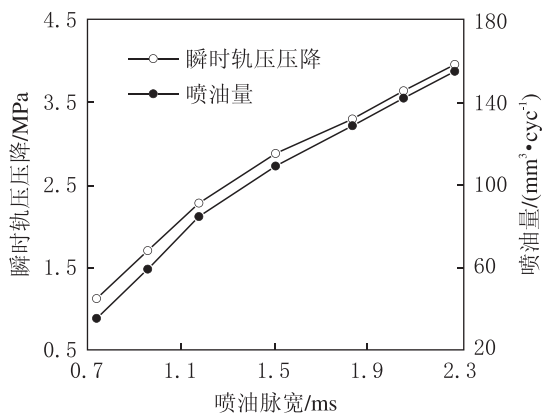


图 6 不同喷油脉宽对应的特征参数变化规律

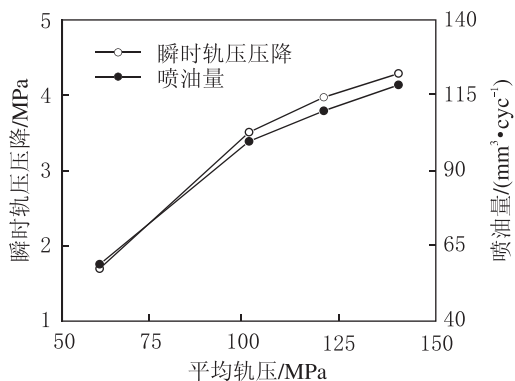


图 7 不同平均轨压对应的特征参数变化规律

由图 7 可知,当平均转速、喷油正时和喷油脉宽不变时,随着平均轨压升高,喷油量和瞬时轨压压降增加,造成轨压波动变大,且喷油量与瞬时轨压压降的单调性一致。

综合图 6 和图 7 看来,平均轨压和喷油脉宽的增大都使得喷油量增大,引起瞬时轨压压降增加,造成轨压波动增大,且喷油量与瞬时轨压压降的单调性一致,故可利用瞬时轨压压降来建立喷油量观测模型对喷油量进行观测。

2.5 观测模型及特征参数辨识

燃油在低压时可视为不可压缩流体,但在高压(30 MPa 以上)时必须考虑其可压缩性,高压系统中轨压变化较大,造成喷油器喷油瞬间引起共轨管内燃油瞬态轨压压降。假定共轨管内的压缩燃油是压力分布均匀的,则根据燃油弹性模量的定义可知:

$$E = -V \frac{dp}{dV} \quad (1)$$

式中, E 为燃油弹性模量; V 为共轨管控制容积; dp 为共轨管中轨压变化量; dV 为共轨管中燃油体积变化量。

根据共轨管的燃油连续性方程^[14]可知:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{E}{V} (Q_{\text{Pump}} - Q_{\text{Inj}} - Q_{\text{LeakInj}}) \quad (2)$$

式中, Q_{Pump} 为高压油泵供入共轨管的燃油体积流量; Q_{Inj} 为喷油器喷入气缸的燃油体积流量; Q_{LeakInj} 为喷油器的燃油泄漏量。

喷油器泄漏包括静态泄漏和动态泄漏两部分,而静态泄漏主要发生在控制活塞偶件和针阀偶件两处。对于喷油器燃油动态泄漏量,由于喷油器回油节流孔直径与喷油孔直径相当,而该喷油器的喷孔数目为 8,且喷油器控制腔压力约为轨压一半,由喷孔流量方程^[15]可推知喷油器燃油动态泄漏量约为喷油量的 10%。将静态泄漏量表示为喷油量的关系式,则喷油器的燃油泄漏量为:

$$Q_{\text{LeakInj}} = (0.1 + K_{\text{LeakInj}}) Q_{\text{Inj}} \quad (3)$$

式中, K_{LeakInj} 为系数项,可由试验数据确定。

针对喷油过程可视为零供油量,由式(2)和式(3)可得喷油量为:

$$V_{\text{Inj}} = \frac{V}{(1.1 + K_{\text{LeakInj}})E} \Delta p_{\text{Inj}} \quad (4)$$

式中, V_{Inj} 为喷油量; Δp_{Inj} 为瞬时轨压压降。

根据燃油弹性模量的经验公式^[15]可知:

$$E = 1200 + 12p \quad (5)$$

共轨管控制容积为:

$$V = V_{\text{CRP}} + V_{\text{HPP1}} + V_{\text{HPP2}} + V_{\text{HPC}} + V_{\text{CRC}} \quad (6)$$

式中, V_{CRP} 为共轨管容积; V_{HPP1} 为高压油泵与共轨管连接的高压油管总容积; V_{HPP2} 为喷油器与共轨管连接的高压油管总容积; V_{HPC} 为喷油器与高压油管连接的高压连接器总容积; V_{CRC} 为共轨管及高压油管发生形变造成的共轨管控制容积补偿量。

高压燃油作用会造成共轨管及高压油管发生形变,故共轨管控制容积补偿量可表示为:

$$V_{\text{CRC}} = K_0 + K_1 p \quad (7)$$

式中, K_0 和 K_1 为系数项。

根据喷油过程燃油连续性方程(式(4))、燃油弹性模量计算公式(式(5))和共轨管控制容积(式(6)),建立喷油量观测的数学模型:

$$V_{\text{Inj}} = \Delta p_{\text{RPF}} \frac{V_{\text{CRP}} + V_{\text{HPP1}} + V_{\text{HPP2}} + V_{\text{HPC}} + K_0 + K_1 p}{(1.1 + K_{\text{LeakInj}})(1200 + 12p)} \quad (8)$$

3 结果与分析

将轨压波形群特征数据库中 195 个稳态试验工

况点数据划分成两组,一组 80 个稳态试验工况点数据用于辨识喷油量观测模型的系数,另一组 115 个稳态试验工况点数据用于验证喷油量观测模型的观测精度。

3.1 模型参数辨识

利用 80 个稳态试验工况点数据采用递推最小二乘法对喷油量观测模型(式(8))的系数进行参数辨识,可得 $K_0 = 2.94, K_1 = 8.76, K_{LeakInj} = 0.046$ 。图 8 和图 9 为喷油量观测模型对喷油量的辨识结果。辨识结果表明,喷油量标定值与测量值的均方根误差 RMSE 为 $2.456 \text{ mm}^3/\text{cyc}$,回归分析的决定系数 R^2 为 0.987,在发动机常用稳态工况范围内喷油量观测模型的辨识精度较高,可用于对喷油量进行观测。

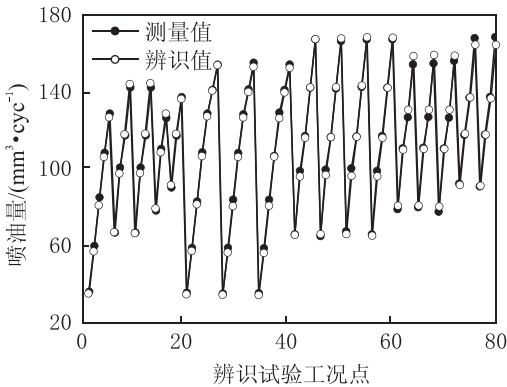


图 8 喷油量辨识值与测量值对比

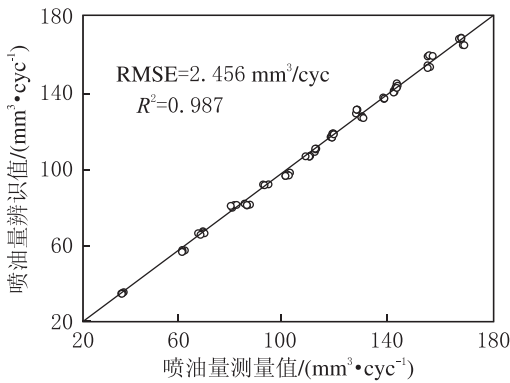


图 9 喷油量辨识值与测量值回归分析

3.2 模型离线验证

由于模型验证试验数据与模型辨识试验数据是分开的,验证试验工况点未参与到喷油量观测模型的参数辨识,因此能够验证所建喷油量观测模型在发动机不同稳态工况下的观测精度。

利用参数辨识后的喷油量观测模型(式(8))对 115 个验证试验工况点参数进行喷油量离线观测,图 10 和图 11 为喷油量观测模型对喷油量的观测结果。

观测结果表明,喷油量观测值与测量值的均方根误差 RMSE 为 $2.725 \text{ mm}^3/\text{cyc}$,回归分析的决定系数 R^2 为 0.980。由此可知,在发动机常用稳态工况范围内喷油量观测模型的观测精度较高,达到了最初的设计目标要求,为喷油量观测模型在 ECU 中的应用奠定了基础。

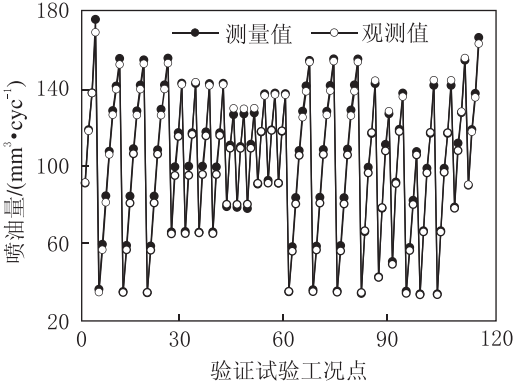


图 10 喷油量观测值与测量值对比

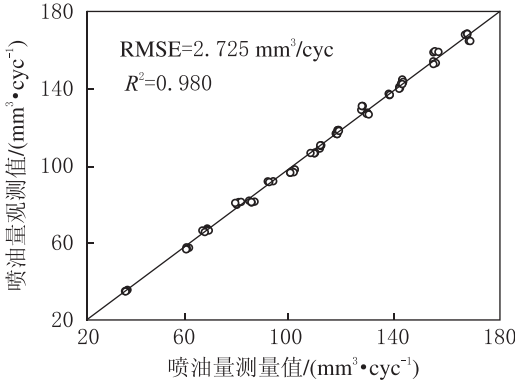


图 11 喷油量观测值与测量值回归分析

4 结论

(1) 将瞬时轨压波形划分成一系列典型片段,定义 4 个特征点和 4 个特征段来描述每缸瞬时轨压波动特征,并定义 10 个特征参数来评价每缸喷油过程的瞬时轨压波动特征。喷油量与瞬时轨压压降具备较强的相关性和较好的单调性,利用瞬时轨压压降和平均轨压可建立喷油量观测模型对喷油量进行观测。

(2) 基于燃油连续性方程,构建了喷油量观测模型。该喷油量观测模型可对喷油量进行较好地观测,喷油量观测值与测量值的均方根误差为 $2.725 \text{ mm}^3/\text{cyc}$,回归分析的决定系数为 0.980。该喷油量观测模型结构简单,观测精度较高,达到了最初的设计目标要求,为喷油量观测模型在 ECU 中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] ALZAHABI B, SCHULZ K. Analysis of pressure wave dynamics in fuel rail system[J]. The International Journal of Multiphysics, 2008,2(3):223-246.
- [2] BENAÏES J, MOLINA S, DE R K, et al. Influence of injection rate shaping on combustion and emissions for a medium duty diesel engine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006,20(9):1436-1448.
- [3] AKIYAMA H, YUASA H, KATO A, et al. Precise fuel control of diesel common-rail system by using OFEM[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2010,2010-01-0876.
- [4] PAYRI F, LUJÁN J, GUARDIOLA C, et al. Injection diagnosis through common-rail pressure measurement [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2006,220(3):347-357.
- [5] OEFELEIN J, DAHMS R. Detailed modeling and simulation of high-pressure fuel injection processes in diesel engines[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2012,2012-01-1258.
- [6] KEKEZ M, RADZISZEWSKI L. Modelling of pressure in the injection pipe of a diesel engine by computational intelligence [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225 (12): 1660-1670.
- [7] RISI A D, NACCARATO F, LAFORGIA D. Experimental analysis of common rail pressure wave effect on engine emissions[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2005,2005-01-0373.
- [8] CATANIA A E, FERRARI A. Experimental analysis, modeling, and control of volumetric radial-piston pumps[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011,133(8):602-610.
- [9] AHLIN K. Modeling of pressure waves in the common rail diesel injection system [D]. Linköping: Linköping University,2000.
- [10] IOANAS G L, DRAGOMIR T L. Common-rail pressure estimation using a Neuro-Fuzzy architecture with local Hammerstein models [C]//Timisoara; IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, 2013.
- [11] POSTRIOTI L, MALAGUTI S, BOSI M, et al. Experimental and numerical characterization of a direct solenoid actuation injector for Diesel engine applications[J]. Fuel, 2014,118:316-328.
- [12] BALLUCHI A, BICCHI A, MAZZI E, et al. Hybrid modelling and control of the common rail injection system[J]. International Journal of Control, 2007,80(11):1780-1795.
- [13] 仇滔,雷艳,彭璟,等. 高压共轨燃油系统轨压控制策略研究 [J]. 内燃机工程, 2013,34(2):83-87.
- QIU T, LEI Y, PENG J, et al. Research of rail pressure control strategy on common rail fuel system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013,34(2):83-87.
- [14] CATANIA A E, FERRARI A, SPESSA E. Numerical-experimental study and solutions to reduce the dwell-time threshold for fusion-free consecutive injections in a multijet solenoid-type CR system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009,131(2):317-332.
- [15] LINO P, MAIONE B, RIZZO A. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007,31(9):1770-1784.

(编辑:许 蕾)