

船用柴油机蓄压式电控喷油器计量特性 数字孪生模型研究

杨博耀^{1,2}, 金江善^{1,2}, 秦慈伟^{1,2}, 董晓露^{1,2}, 夏椿翔^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 为实时准确地观测电控喷油器的喷油量, 实现喷油过程的闭环控制, 针对某船用柴油机蓄压式电控喷油器结构特征, 根据其燃油流动过程和蓄压腔压力变化规律, 利用理论机理计算与神经网络修正相结合的方法, 建立了电控喷油器计量特性数字孪生模型。通过建立快速原型样机进行在线试验验证, 对比喷油器计量特性数字孪生模型观测值与平台实测值。试验结果表明: 当电控喷油器每循环喷油量大于 $1\ 000\ \text{mm}^3$ 时, 喷油量计算误差在 3% 以内; 当每循环喷油量小于 $1\ 000\ \text{mm}^3$ 时, 喷油量计算误差在 10% 以内。

关键词: 船舶柴油机; 电控喷油器; 计量特性; 数字孪生模型; 快速原型样机

中图分类号: TK423.8⁺4; TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0018-07

Research on the Digital Twin Model of Metrological Characteristics of Accumulator Type Electronic Fuel Injectors for Marine Diesel Engines

Yang Boyao^{1,2}, Jin Jiangshan^{1,2}, Qin Ciwei^{1,2}, Dong Xiaolu^{1,2}, Xia Chunxiang^{1,2}

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: In order to observe the injection quantity of electronic controlled injector accurately in real time, and realize the closed-loop control of injection process, a digital twin model of metrological characteristics of electronic controlled injector was established based on the structural characteristics of a marine diesel engine accumulator electronically controlled injector. According to the fuel flow process and the pressure change law of the accumulator chamber, the establishment of the model was realized by combining theoretical calculation with neural network correction. Through the establishment of a rapid prototype for on-line test verification, the digital twin model observation values and the platform measured values were compared. The test results show that when the fuel injection volume per cycle of the electronic control injector is larger than $1\ 000\ \text{m}^3$, the calculation error of the fuel injection quantity is within 3%; when the fuel injection volume per cycle is less than $1\ 000\ \text{m}^3$, the calculation error of the fuel injection quantity is within 10%.

Key words: marine diesel engine; electronic fuel injector; metrological characteristic; digital twin model; rapid prototype

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2020-12-12

基金项目: 上海市优秀技术带头人项目 (19XD1433600)。

作者简介: 杨博耀(1996—), 硕士研究生, 主要研究方向为船用柴油机电控喷油器, 1311910631@qq.com。

0 引言

实现船用柴油机高压共轨系统电控喷油器计量特性在线观测, 对于实现在全工况全生命周期内船用柴油机的各缸一致性控制及故障诊断至关重要。其关键在于须对高压共轨系统电控喷油器计量特性实时在线监测并反馈到电控单元 (ECU), ECU 据此进行分析判断和调整喷油控制参数, 从而实现高压共轨系统喷油过程的闭环控制。近年来, 随着数字化、信息化技术的飞速发展, 信息物理系统 (CPS) 的提出和日渐成熟, 为船用柴油机高压共轨系统喷油过程的闭环控制提供了解决方案。

CPS 是一种结合了信息网络世界和动态物理世界, 通过计算、通信与控制技术, 实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务的多维复杂系统。数字孪生是在虚拟空间创建物理对象的高保真模型, 同步物理实体的行为, 并提供反馈。数字孪生模型的构建是实现 CPS 的必要基础, 也是更加直观和有效的手段^[1]。

数字孪生近年来在全球范围内广受关注, IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 自 2017 年起连续三年将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一。目前针对数字孪生的研究主要集中在理论框架的构建以及实际应用的探索等方向。理论研究方面集中在数字孪生模型架构、仿真技术以及基于数字孪生的产品全生命周期预测和维护^[2-7]; 数字孪生的实际应用逐渐从以航空航天智能运维技术为代表的工业化领域向智慧城市、数字政府等城市化、全球化领域扩展^[8-9]。在柴油机领域, 数字孪生技术可以有效缩短柴油机的设计及生产制造周期, 同时在运行阶段可以对柴油机的运行状态进行实时监测、故障预警以及剩余寿命预测。目前数字孪生技术在柴油机上的应用相对较少, 多用于零件的加工^[10-11]。

本文基于一种船用柴油机蓄压式电控喷油器, 建立其计量特性数字孪生模型, 可用于实时在线监测电控喷油器的计量特性, 并据此调整控制参数, 从而实现喷油量的闭环控制。

1 蓄压式电控喷油器

本文的研究对象为一种带蓄压腔的船用柴油机电控喷油器, 如图 1 所示。该电控喷油器主要由针阀偶件、控制柱塞偶件、电磁阀、蓄压腔等部分组成。来自共轨管的高压燃油进入喷油器体主油道后分为四路: 一路进入喷油器体头部的蓄压腔, 一路通过进油量孔进入控制腔, 剩余两路向下进入针阀

偶件的盛油槽。

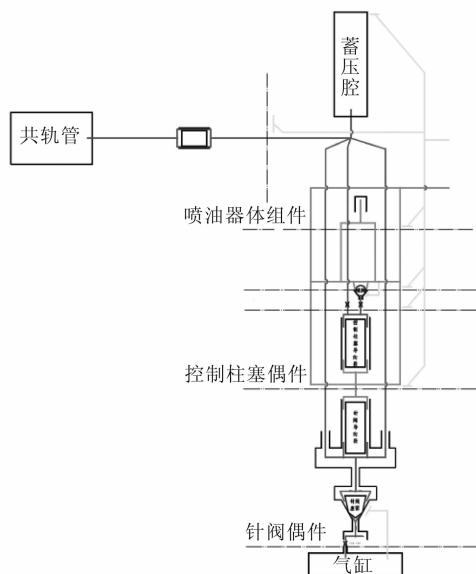


图 1 电控喷油器原理图

电控喷油器的计量特性是指每循环的喷油量与共轨压力及喷射驱动脉宽之间的关系, 即:

$$Q = f(p, T) \quad (1)$$

式中: Q 为电控喷油器的循环喷油量, m^3 ; p 为共轨压力, Pa ; T 为喷射驱动脉宽, ms 。

喷油过程中, 蓄压腔中的高压燃油会流入压力较低的控制腔和盛油槽, 导致蓄压腔压力降低, 同时, 共轨管中的高压燃油会流入蓄压腔; 喷油结束后蓄压腔内的燃油不再流出, 共轨管的高压燃油持续流入蓄压腔, 蓄压腔压力回升至轨压附近, 如图 2 所示。

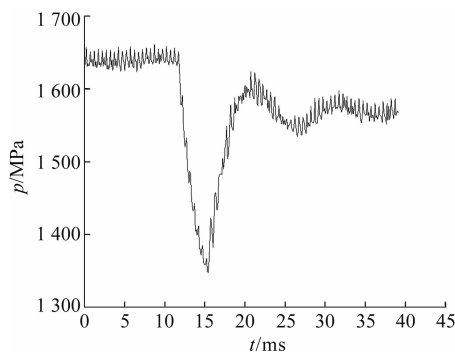


图 2 蓄压腔压力变化

本文基于电磁阀电流信号和蓄压腔压力信号建立电控喷油器计量特性数字孪生模型。

2 电控喷油器计量特性数字孪生模型

2.1 电控喷油器计量特性 CPS 框架

电控喷油器计量特性 CPS 框架分为物理空间和虚拟空间两部分, 如图 3 所示。物理空间包含电

控喷油器、共轨管以及 ECU。ECU 通过控制轨压和喷油脉宽控制电控喷油器的喷油量。虚拟空间为电控喷油器的计量特性数字孪生模型,将在物理空

间采集的蓄压腔压力信号和电磁阀电流信号输入到虚拟空间中,提取信号特征并通过电控喷油器计量特性数字孪生模型计算喷油量。

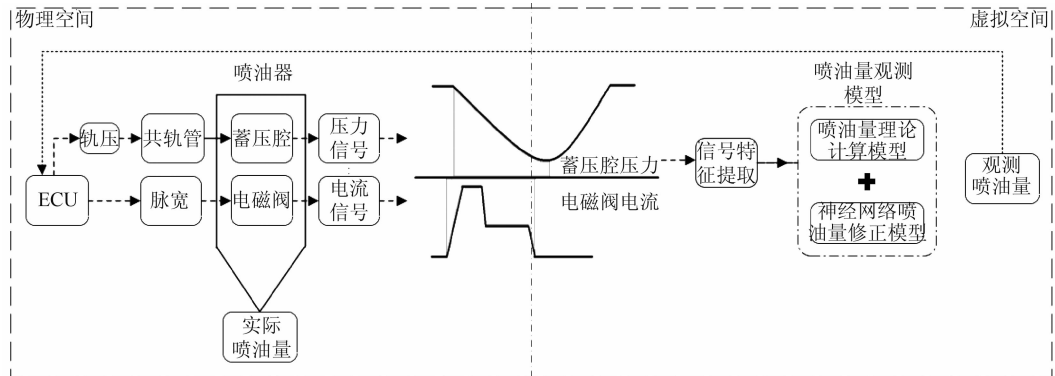


图3 电控喷油器计量特性 CPS 框架

2.2 电控喷油器计量特性数字孪生模型

在高压共轨系统中,燃油的可压缩性不可忽略。通常用体积弹性模量 K 来表征燃油的可压缩性。 K 表示液体产生单位体积相对变化量时所需的压力增量,即:

$$K = -V \frac{dp}{dv} \quad (2)$$

式中: K 为燃油体积弹性模量, Pa; V 为蓄压腔容积, m^3 ; dp 为蓄压腔压力变化量, Pa; dv 为蓄压腔中燃油体积变化量, m^3 。

燃油的体积弹性模量随温度和压力变化。张建明的研究提供了一种计算方法^[12], 如式 (3):

$$K(p, T) = a_0(p + a_1 - a_2 T)^{a_3} \quad (3)$$

式中: p 为燃油压力, Pa; T 为燃油温度, $^{\circ}C$; $a_0 = 34.74$, $a_1 = 111\,061\,456.8$, $a_2 = 469\,742.34$, $a_3 = 0.947$ 。

忽略工作过程电控喷油器中的燃油温度变化, T 取 $40\,^{\circ}C$, 燃油体积弹性模量可简化为:

$$K = 13.36p + 1.233 \times 10^9 \quad (4)$$

在整个喷油过程中, 喷油器的进油流量为从共轨管流入蓄压腔的体积流量。出油流量为两部分: 分别为电控喷油器喷入气缸的燃油体积流量, 以及喷油过程的燃油回油体积流量。因此整个喷油器的燃油连续方程可以表示为:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K}{V}(Q_{in} - Q_{inj} - Q_L) \quad (5)$$

式中: Q_{in} 为从共轨管流入蓄压腔的燃油体积流量, m^3/s ; Q_{inj} 为喷油器喷入气缸的燃油体积流量, m^3/s ; Q_L 为喷油过程中的燃油回油体积流量, m^3/s 。

根据公式 (5), 可得电控喷油器喷入气缸的燃油体积流量:

$$Q_{inj} = -\frac{V}{K} \frac{dp}{dt} - Q_L + Q_{in} \quad (6)$$

由于在高压燃油作用下蓄压腔会发生形变, 从而使蓄压腔容积发生变化, 因此在计算蓄压腔容积时须增加一个与燃油压力相关的修正量^[13], 具体如下:

$$V = V_0 + C_1 p + C_2 \quad (7)$$

式中: V_0 为蓄压腔的初始容积, m^3 ; p 为蓄压腔燃油压力, Pa; C_1 、 C_2 为修正参数。

喷油过程中从共轨管流入蓄压腔的燃油体积流量和共轨管与蓄压腔中的燃油压力之差相关, 且该压力差越大, 从共轨管流入蓄压腔的燃油体积流量越大。容积腔的存在减小了喷油过程中共轨管的压力波动, 忽略喷油过程中共轨管的燃油压力变化, 蓄压腔压力的跌落量即为共轨管与蓄压腔的燃油压力之差, 因此喷油过程中蓄压腔的进油体积流量可以表示为:

$$Q_{in} = C_{fA} \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (8)$$

式中: C_{fA} 为共轨管到蓄压腔的有效流动面积, m^2 ; p_0 为蓄压腔压力开始跌落时的压力值, Pa; ρ 为燃油密度, kg/m^3 。

电控喷油器喷油过程中的回油主要包括两部分: 一部分是电控喷油器喷油过程中从控制腔的出油量孔流出的燃油, 可以根据公式 (8) 将出油量孔处流出的燃油体积流量表示为喷入气缸的燃油体积流量的百分比; 另一部分是从控制柱塞偶件和针阀偶件处间隙泄漏产生的回油流量, 可以用喷入气缸的燃油体积流量表示。喷油器的燃油回油体积流量可以表示为:

$$Q_L = (C_3 + C_4) Q_{inj} \quad (9)$$

式中： C_3 、 C_4 为修正参数。

将公式 (4)、(7)、(8)、(9) 代入公式 (6) 可得：电控喷油器喷入气缸的燃油体积流量为：

$$Q_{\text{inj}} = \frac{c_f A}{1 + C_3 + C_4} \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} - \frac{1}{1 + C_3 + C_4} \cdot \frac{V_0 + C_1 p + C_2}{13.36p + 1.233 \times 10^9} \frac{dp}{dt} \quad (10)$$

在整个喷油过程中，蓄压腔压力从轨压附近开始跌落的点可以看作喷油始点 (t_0 , p_0)，蓄压腔压力大幅跌落过程中的最低点 (t_m , p_m) 则表征喷油结束。

对公式 (10) 左右两边在 $t_0 \sim t_m$ 时间段内积分，可得电控喷油器每循环的喷油量：

$$V_{\text{inj}} = \frac{c_f A}{1 + C_3 + C_4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \int_{t_0}^{t_m} \sqrt{p_0 - p} dt - \frac{1}{1 + C_3 + C_4} \cdot \int_{p_0}^{p_m} \left(\frac{C_1}{13.36} + \frac{V_0 + C_2 - \frac{1.233 \times 10^9}{13.36}}{13.36p + 1.233 \times 10^9} \right) dp \quad (11)$$

式中： V_{inj} 为电控喷油器每循环的喷油量， m^3 ； $C_1 \sim C_4$ 为修正参数； V_0 为蓄压腔的初始容积， m^3 ； $C_f A$ 为共轨管到蓄压腔的有效流动面积， mm^2 ； t_0 为蓄压腔压力开始跌落的时间， s ； t_m 为蓄压腔压力跌落最低点的时间， s ； p_0 为蓄压腔压力开始跌落的压力值， Pa ； p_m 为蓄压腔压力跌落最低点的压力值， Pa ； ρ 为燃油密度， kg/m^3 。

式 (11) 中 $C_1 \sim C_6$ 为修正参数，可看作常数，蓄压腔的固定容积 V_0 是已知量，因此可以令：

$$b_1 = \frac{C_f A}{1 + C_3 + C_4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

$$b_2 = \frac{C_1}{13.36} \cdot \frac{1}{1 + C_3 + C_4}$$

$$b_3 = \left(V_0 + C_2 - \frac{1.233 \times 10^9}{13.36} \right) \cdot \frac{1}{1 + C_3 + C_4}$$

得到以下喷油量计算公式：

$$V_{\text{inj}} = b_1 \int_{t_0}^{t_m} \sqrt{p_0 - p} dt - \int_{p_0}^{p_m} \left(b_2 + \frac{b_3}{13.36p + 1.233 \times 10^9} \right) dp \quad (12)$$

式中： b_1 、 b_2 、 b_3 为修正参数。

实际测得的蓄压腔压力信号为在一定采样时间内采集的一系列离散的点，因此：

$$\int_{t_0}^{t_m} \sqrt{p_0 - p} dt = \sum_{i=1}^{\frac{t_m - t_0}{T_0}} \frac{\sqrt{p_0 - p_i} + \sqrt{p_0 - p_{i+1}}}{2} T_0 \quad (13)$$

式中： T_0 为采样时间， s 。

将式 (13) 代入式 (12)，可得：

$$V_{\text{inj}} = b_1 \sum_{i=1}^{\frac{t_m - t_0}{T_0}} \frac{\sqrt{p_0 - p_i} + \sqrt{p_0 - p_{i+1}}}{2} \cdot T_0 - b_2 \cdot p \Big|_{p_0}^{p_m}$$

$$- \frac{b_3}{13.36} \cdot \ln(13.36p + 1.233 \times 10^9) \Big|_{p_0}^{p_m} \quad (14)$$

3 电控喷油器计量特性数字孪生模型参数辨识及修正

3.1 参数辨识

参数辨识是一种将理论模型与试验数据相结合用于预测的技术，可以对复杂的过程进行有效预测。根据机理推导的喷油量计算公式 (14) 中含有三个未知参数， b_1 、 b_2 、 b_3 ，其值可通过参数辨识的方法加以确定。

为保证参数辨识结果在全工况下的准确性，试验选取了轨压 40 ~ 140 MPa、脉宽 0.5 ~ 4 ms 范围内的 182 个工况点（不包括验证所用工况），进行喷油量测量和蓄压腔压力信号采集。为避免试验重复性的影响，每个工况间隔测量五个循环的数据。同时将电控喷油器常用的六个工况的试验数据用于验证参数辨识的结果。六个常用工况如表 1 所示。

表 1 电控喷油器常用工况

编号	轨压/MPa	脉宽/ms
1	60	1.9
2	80	2.8
3	100	2.8
4	120	2.9
5	140	3.3
6	140	3.5

本文采用参数辨识最常用的最小二乘法，对经处理后的采集数据进行计算。参数辨识结果如表 2 所示。对喷油量的实测值与代入辨识结果的计算值进行回归分析，如图 4 所示，回归分析的决定系数 R^2 为 0.958，喷油量均方根误差 (RMSE) 为 15.67 mm^3 。

表 2 参数辨识结果

参数	b_1	b_2	b_3
数值	1.82	-178.51	27.81

用于验证的六个常用工况下电控喷油器的实测值与计算值如图 5 所示。

蓄压腔压力存在一定的波动，每次喷油的信号特征有一定差异，最小二乘法通过喷油量计算值与实测值间误差的平方和为最小来辨识三个未知参数。六个常用工况的喷油量误差均在 100 mm^3 以内，喷油量较大的工况喷油量误差在 5% 以内，但喷油量较小的工况喷油量误差超过 10%，须采取修正措施对喷油量进行修正。

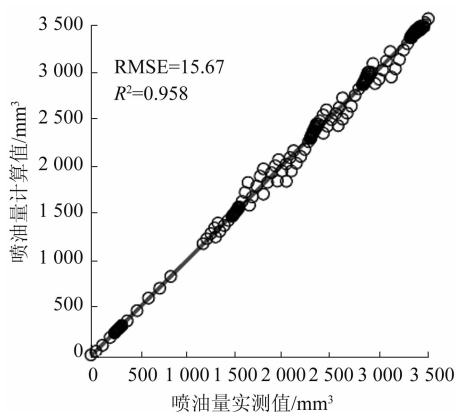


图 4 喷油量实测值与计算值回归分析

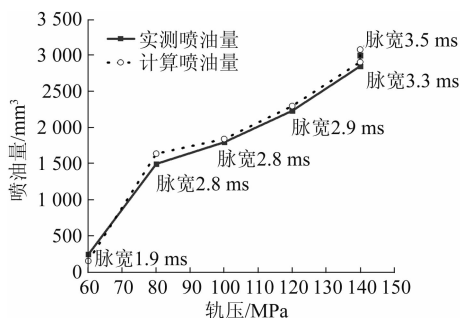


图 5 喷油量实测值与计算值对比

3.2 模型修正

针对参数辨识结果存在的误差,采用神经网络方法基于已测数据对电控喷油器计量特性数字孪生模型进行修正。

本文选用径向基(RBF)神经网络建立喷油量的修正模型。相比于其他神经网络,RBF神经网络结构简单、训练简洁且训练速度更快,并具有很强的非线性映射能力,能够实现较高精度修正。RBF神经网络是一种三层的前向神经网络,由输入层、隐藏层和输出层组成,其结构如图6所示。其中,隐含层的作用是把向量从低维度的 p 映射到高维度的 h ,这样低维度线性不可分的情况到高维度就可以变得线性可分。

RBF神经网络的激活函数可表示为:

$$R(x_p - c_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_p - c_i\|^2\right) \quad (15)$$

根据 RBF 神经网络的结构得到网络的输出为:

$$y_i = \sum_{j=1}^h w_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_p - c_j\|^2\right) \quad j=1, 2, \dots, n \quad (16)$$

由电控喷油器计量特性数字孪生模型可知,喷油量的变化与喷油始点蓄压腔压力 p_0 、喷油终点蓄压腔压力 p_m 以及燃油喷射脉宽有关。使用 p_0 、 p_m 、 T 三个特征量作为神经网络的输入,喷油量修正量(喷油量实测值与计算值的差值)作为神经

网络的目标输出,对神经网络进行训练。

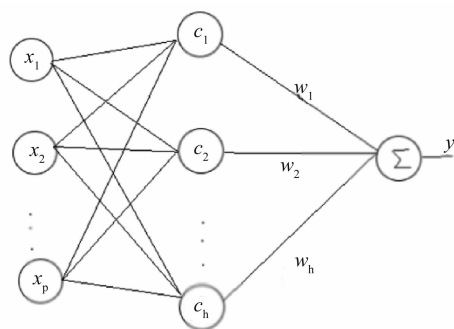


图 6 RBF 神经网络结构

训练完成后,对六个常用工况的喷油量计算值与修正值求和,得到最终的喷油量观测值,如图7所示。六个常用工况下喷油量观测值误差均在 50 mm^3 以内,误差均小于2%。

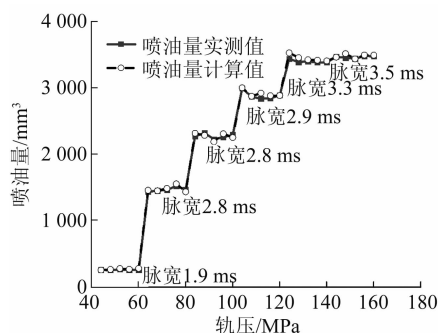


图 7 修正后喷油量实测值与计算值对比

4 快速原型样机搭建及验证

4.1 快速原型样机搭建

本文在电控喷油器喷油量理论计算模型和神经网络修正模型的基础上,通过dSPACE的MicroAutoBox硬件设备,搭建快速原型样机,用于试验验证。

基于Matlab/Simlink建立电控喷油器的计量特性数字孪生模型,如图8所示。

模型由三个功能模块组成,信号采集处理模块、特征提取模块以及喷油量计算模块。

信号采集处理模块对传感器采集的电磁阀电流信号和蓄压腔压力信号进行A/D转换、采样、数字滤波和信号截取。A/D转换使用与MicroAutoBox匹配的ADC模块;采样时间设为 0.1 ms ;数字滤波采用巴特沃夫低通滤波器;信号截取是为实时计算每循环喷油量而截取出每个循环喷油过程中的蓄压腔压力变化。信号截取以电磁阀电流信号为触发信号,在充分考虑开启延迟和关闭延迟后,每个循环截取 10 ms 的蓄压腔压力,以电磁阀电流数据形式用于后续计算。

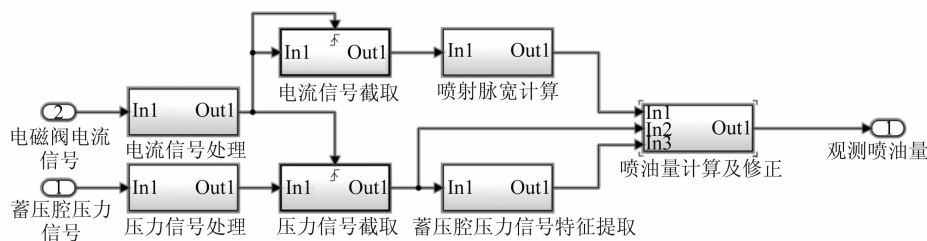


图 8 基于 Matlab/Simlink 的电控喷油器计量特性数字孪生模型

特征提取模块用于提取计量特性计算模块须使用的各信号特征, 分别为: 喷油过程蓄压腔压力跌落始点 (t_0, p_0); 蓄压腔压力跌落终点 (t_m, p_m); p_0 到 p_m 之间的蓄压腔压力以及燃油喷射脉宽 T 。

喷油量计算模块由喷油量理论计算模型与喷油量神经网络修正模型组成, 输入各特征值, 得到电控喷油器数字孪生模型喷油量的最终计算值。

4.2 试验验证

电控喷油器的计量特性数字孪生模型试验验证系统如图 9 所示。将在 Matlab/Simlink 下搭建的电控喷油器数字孪生模型编译下载到 MicroAutoBox 中; 电控喷油器安装在电控喷油器研究试验台上, 通过试验台的单次喷射仪测量实际喷油量; 传感器测得的电磁阀电流信号和蓄压腔压力信号接入 MicroAutoBox, 通过上位机 ControlDesk 软件实时观测 MicroAutoBox 中电控喷油器计量特性数字孪生模型运行得到的喷油量。

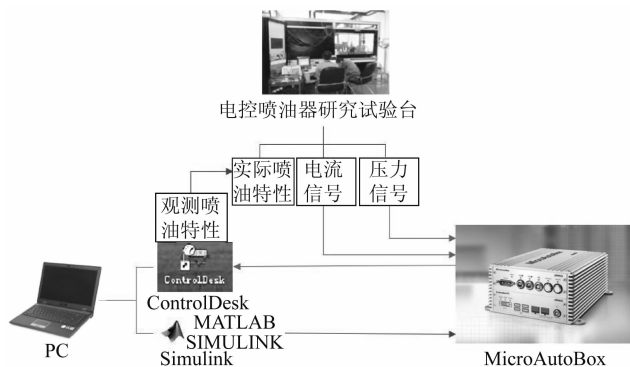


图 9 电控喷油器的计量特性数字孪生模型试验验证系统

试验验证同样选择常用的六个工况, 每个工况记录五个循环的实际喷油量和计算喷油量, 结果如图 10 所示。

六个常用工况的 30 组数据对比显示: 喷油量误差的平均值为 31 mm^3 ; 28 组喷油量误差在 50 mm^3 以内, 2 组喷油量误差为 $50 \sim 100 \text{ mm}^3$ 。喷油量误差的平均值为 1.79%; 循环喷油量大于 1000 mm^3 的工况喷油量误差在 3% 以内, 循环喷油量小于 1000 mm^3 的工况喷油量误差在 4% ~ 9%。

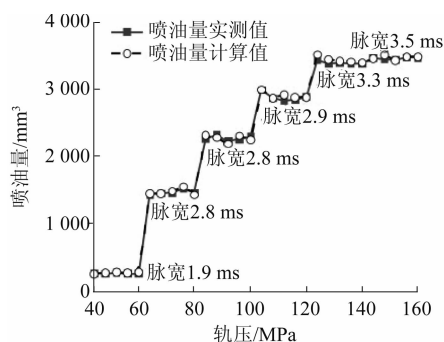


图 10 试验验证喷油量实测值与计算值对比

5 结论

(1) 结合理论机理模型与神经网络修正模型建立的电控喷油器计量特性数字孪生模型, 能够实时观测喷油器运行过程中每循环喷油量, 为燃烧过程的闭环控制提供了基础。

(2) 电控喷油器计量特性数字孪生模型在喷油量大于 1000 mm^3 时能够较准确地计算喷油器的实时喷油量, 误差在 50 mm^3 以内, 误差小于 3%。

参考文献

- [1] 陶飞, 戚庆林, 王力羣, 等. 数字孪生与信息物理系统——比较与联系 [J]. 工程, 2019, 5 (4): 653-661.
- [2] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 1-18.
- [3] 周成, 孙恺庭, 李江, 等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统 [J/OL]. 计算机集成制造系统, 2020, [2020-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200817.0917.008.html>.
- [4] 蔡笑驰, 姚怡芝, 李鑫. 数字孪生技术在船舶全生命周期的应用架构 [J]. 船舶设计通讯, 2019 (2): 27-32.
- [5] QIAO Q Z, WANG J J, YE L K, et al. Digital twin for machining tool condition prediction [J]. Procedia CIRP, 2019, 81: 1388-1393.
- [6] ARMENDIA M, CUGNON F, BERGLIND L, et al. Evaluation of machine tool digital twin for machining opera-

- tions in industrial environment [J]. Procedia CIRP, 2019, 82: 231-236.
- [7] NEGRI E, BERARDI S, FUMAGALLI L, et al. MES-integrated digital twin frameworks [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 58-71.
- [8] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用 [J/OL]. 航空学报, 2020, [2020-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20200316.0946.006.html>.
- [9] 安世亚太. 数字孪生体技术白皮书 2019 [R/OL]. (2019-12-30) [2020-10-03]. http://www.peraglobal.com/content/details_155_20653.html.

- [10] 刘金锋, 赵鹏, 周宏根, 等. 数字孪生驱动的机械加工工艺评价方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 298-308.
- [11] 陈聪. 基于数字孪生的船用柴油机活塞加工质量管控方法研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [12] 张建明, 张卫刚, 王亚伟, 等. 柴油高压物理特性的研究 [J]. 高压物理学报, 2005, 19 (1): 41-44.
- [13] 凌健, 谢辉. 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 [J]. 内燃机工程, 2017, 38 (1): 61-69.

(上接第 17 页)

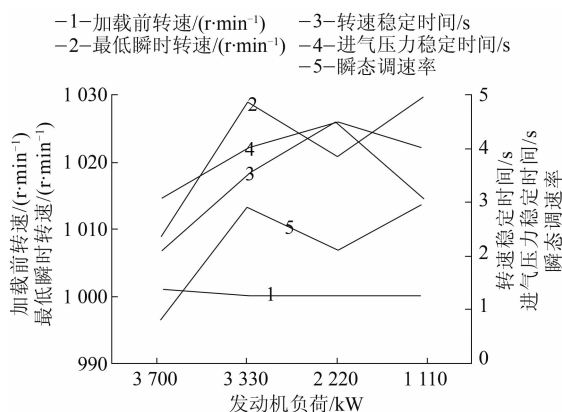


图 7 调整后突卸负荷发动机参数

5 结论

本文分析了突变负荷时大功率天然气发动机响应滞后的原因, 并提出了更换更小截面的涡轮增压器喷嘴环、调整点火提前角以及设置燃气喷射量限值等改进措施。试验验证表明: 发动机的瞬态调速率、转速稳定时间、进气压力稳定时间等均能满足 G2 级别发电机组的性能要求。改进后的大功率天然气发动机在突变负荷情况下具有较好的响应性能。

参考文献

- [1] 花传杰, 刘民成. 废气涡轮增压发动机瞬态响应特性分析 [J]. 车用发动机, 1997 (1): 61-62.
- [2] 丁昱. 燃气调压撬的设计与应用 [J]. 中国新技术新产品, 2012 (18): 128.
- [3] 陆家祥. 柴油机涡轮增压技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [4] 李树生. 高性能大功率天然气发动机燃烧系统开发研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [5] 康雷朋, 张军乐, 尹建, 等. 发电用途天然气发动机增压匹配试验研究 [C] //中国内燃机学会. 中国内燃机学会第九届学术年会论文集. 2016.
- [6] 张众杰, 刘瑞林, 夏南龙, 等. 车用柴油机瞬态特性劣变机理及优化策略 [J]. 军事交通学院学报, 2018, 20 (8): 34-39.
- [7] 张龙平, 刘忠长, 田径, 等. 边界条件对柴油机瞬态工况燃烧特征参数的影响 [J]. 内燃机工程, 2015, 36 (4): 25-30.
- [8] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [9] 蒋德明. 高等内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.