

基于神经网络的柴油机韦博参数预测研究

李文辉 刘长铨 马修真 夏文 张子鉴

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 韦博公式作为柴油机零维燃烧模型中较通用的放热率计算半经验公式,被广泛应用于柴油机工作过程的仿真中,其模拟的准确性主要依赖于公式中参数的选取,但常规选取方式存在一定的盲目性且普适性较差。针对这一问题,以上柴 D4114B 型发电用柴油机为例,提出了一种基于神经网络的柴油机韦博公式参数的预测方法,通过实验所测缸压曲线反推燃烧放热率、放热率曲线的数值拟合和神经网络的训练建立可用于韦博公式参数预测的神经网络模型,通过预测精度评价、预测结果与实验数据的对比,验证了这种预测方式的准确性。最后,基于该方法建立了柴油机的动态仿真模型,通过部分参数实验值与仿真值的比较,证明该方法在柴油机动态仿真中的可行性。

关键词: 柴油机; 神经网络; 数值模拟; 韦博公式; 预测

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0365-07

Wiebe Parameters Prediction of Diesel Engine Based on Neural Network

Li Wenhui Liu Changcheng Ma Xiuzhen Xia Wen Zhang Zijian

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Wiebe formula as a semi-empirical formula that calculates heat release in the zero-dimensional combustion model of diesel engine was widely used in the simulation of working process of diesel engine, the accuracy of simulation was mainly dependent on choice of parameters in the formula, but there were some blindness and poor universality in the traditional Wiebe parameters selection method. So in view of shortcoming of the selection method, the D4114B type electricity-generating diesel engine was taken as an example, a diesel engine Wiebe formula parameters prediction method was proposed based on neural network. By experimental measurement of cylinder pressure curve, the combustion heat release rate was backward deducted, the heat release rate curve was numerically fitted, and the neural network was trained, a neural network which can be used to predict the parameters of Wiebe formula was established. Through the comparison of predicted results and experimental data, and evaluation of prediction accuracy, the accuracy and feasibility of prediction method were verified. On this basis, D4114B diesel engine dynamic simulation model was set up by using Modelica language, and the transient performance of diesel engine was simulated and researched. Finally, the simulation results of neural network input parameters were compared with experimental value, which proved the Wiebe formula parameters prediction method can be applied to the diesel engine dynamic simulation study.

Key words: diesel engine; neural network; numerical simulation; Wiebe formula; prediction

引言

柴油机的燃烧过程是整个工作过程的关键,针

对燃烧过程的研究一直是柴油机研究工作的重点。到目前为止,人们还难以从燃烧机理上准确地描述燃烧过程,所以柴油机燃烧过程的数值计算都是基

于现有的数学模型,包括:零维、准维和多维燃烧模型^[1]。由于零维燃烧模型具有参数间关系简单、容易求解等诸多优点而被广泛应用^[2]。王贺春等^[3]将零维燃烧模型用于核电应急发电用柴油机工作过程仿真;孙俊等^[4]利用优化理论对柴油机零维燃烧模型的经验参数进行了优选;GREGORY 等^[5]在零维燃烧模型的基础上创建了 HCCI 柴油机燃烧模型并将其应用于柴油机的控制分析。目前,国内外较通用的计算零维燃烧放热率的半经验公式是韦博公式^[6],在实际应用中其准确性取决于公式中具有非线性关系的经验参数的选取。常规的韦博参数选取方式是:在以实验为基础的有限工况点上,以实验数据为目标,手动调整不确定的韦博公式参数以获取最佳值,而其他工况点的模型参数则只能按照经验公式选取。但由于手动调整具有一定的盲目性,且经验公式的普适性较差,难以针对所有机型及不同工况确定最佳参数,因而造成了工作过程模拟准确性不高的现象^[7]。

考虑到神经网络具有较强的系统辨识能力,适合预测韦博公式参数之间的非线性关系^[8],因此本文提出一种基于神经网络的韦博公式参数预测方法,并以 D4114B 型发电用柴油机为例进行韦博参数预测和仿真研究。

1 常规选取方式对工作过程仿真的影响

1.1 基于常规选取方式的工作过程模型建立

为了研究常规韦博参数选取方式对柴油机工作过程仿真的影响,并指出其存在的不足,利用 Modelica 语言建立了基于常规韦博参数选取方式的实验用柴油机单个气缸工作过程仿真模型。实验所用机型的基本参数见表 1,燃烧过程采用双韦博燃烧放热规律计算,气缸周壁的传热率按照 Woschini 公式计算,机械损失采用 Winterbone 公式计算^[9]。

表 1 实验机型基本参数

Tab.1 Basic parameters of test engine

参数	数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
怠速转速/(r·min ⁻¹)	700
活塞行程/mm	130
气缸直径/mm	114
压缩比	17.3
供油提前角/°CA	14
活塞总排量/L	5.308
标定功率/kW	90

1.2 常规选取方式存在的不足

为了指出常规韦博参数选取方式存在的问题,

对转速为 1 500 r/min、负荷范围 20% ~ 100% 的 8 个工况进行柴油机工作过程的仿真研究,并将仿真值与实验测量值进行对比,如图 1 所示。其中,45%、100% 工况下的韦博公式参数以实验结果为目标来确定,而其他工况下的韦博公式参数则利用经验公式确定,选取与燃烧过程密切相关且能够实测的缸内爆压和输出功率作为模型准确性的参考。

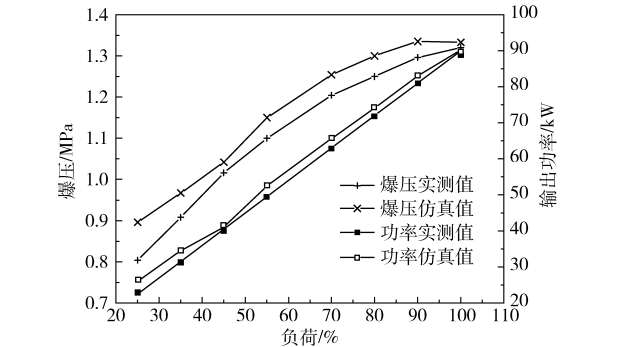


图 1 实验值与仿真值的比较

Fig.1 Comparison of test and simulation values

可以看出,除以实验结果为目标选取了韦博公式参数的工况点外,其他各工况点处的误差较大。虽然传热模型温度设定、程序的计算精度等因素可能引入误差,但在各个工况的仿真中这些因素的选取或设定的方式是类似的;而韦博模型参数选取方式却存在较大差异(45%、100% 负荷工况的韦博参数是以实验结果为目标确定的;其他工况点的韦博参数是通过经验公式计算得到的),因此造成这种现象的主要原因是韦博参数选取方式存在问题。多个韦博参数之间具有非线性的关系,现有的经验公式很难针对不同机型、不同工况下的韦博参数准确选取。因此为了解决这一问题,本文提出了一种基于神经网络的韦博公式参数预测方法。

2 韦博公式参数预测方法

以上柴 D4114B 型发电用柴油机为例,通过实验所测缸压反推燃烧放热率、放热率曲线的数值拟合以及神经网络的训练建立双韦博公式参数的预测模型,流程如图 2 所示。

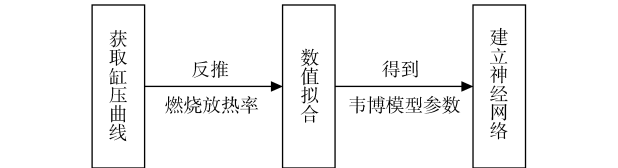


图 2 神经网络建立流程

Fig.2 Establishment process of neural network

2.1 缸压曲线反推燃烧放热率

实验机型是发电用柴油机,故通过实验测量了负荷特性下(转速 1 500 r/min)的多条缸压曲线,由

于柴油机难以绝对稳定地运转且实验中电磁、振动等干扰对缸压曲线的影响,将不可避免地引起缸内压力曲线导数的不连续性,产生锯齿波,因此为了保证后续拟合的准确进行,需要对所得的缸压曲线进行光顺处理^[10]。以额定转速下的某条缸压曲线为例,将光顺前后的缸压曲线进行对比,如图 3 所示。

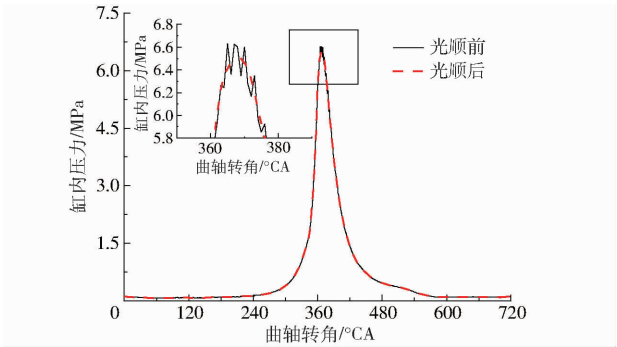


图 3 光顺前后的缸压曲线

Fig. 3 Cylinder pressure curves before and after smoothing

利用缸内工作过程基本公式反推燃烧放热率,根据缸内能量守恒有

$$\frac{dm_B}{d\varphi} = mc_v \frac{dT}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi} \tag{1}$$

气缸周壁传热公式采用 Woschni 公式计算^[11],气缸容积变化率由运动学关系导出^[12],即

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 \frac{dQ_{wi}}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 \alpha_g A_i (T - T_{wi}) \tag{2}$$

$$\frac{dV}{d\varphi} = \frac{V_s}{2} \left(\sin\varphi + \frac{\lambda \sin(2\varphi)}{2 \sqrt{1 - \lambda^2 \sin(2\varphi)}} \right) \frac{\pi}{180} \tag{3}$$

式中 p ——气缸内工质压力
 m ——缸内工质质量
 m_B ——缸内柴油质量
 c_v ——定容比热 T ——温度
 T_w ——壁面温度 A ——换热面积
 α_g ——瞬时平均换热系数
 Q_w ——瞬时传热量
 V ——燃烧室瞬时容积
 V_s ——气缸工作容积
 λ ——曲柄连杆比 φ ——曲轴转角

2.2 放热率曲线的数值拟合

利用所得的燃烧放热率曲线和有效的拟合工具,以双韦博公式为拟合目标函数,获取燃烧开始角、燃烧持续角等未知参数的取值。

双韦博燃烧放热率表达式^[13]为

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = g_f H_u \sum_{i=1}^2 6.908 \lambda_i \frac{m_i + 1}{\varphi_{Zi}} \left(\frac{\varphi - \varphi_{Bi}}{\varphi_{Zi}} \right)^{m_i} \cdot \exp \left(-6.908 \frac{\varphi - \varphi_{Bi}}{\varphi_{Zi}} \right)^{m_i + 1} \tag{4}$$

其中 $\varphi_{B2} = \varphi_{B1} + 0.5\varphi_{Z1}$ $\lambda_1 = 1 - \lambda_2$

式中 φ_{Zi} ——燃烧持续角
 g_f ——单缸循环供油量
 φ_{Bi} ——燃烧起始角
 m_i ——燃烧品质指数
 λ_i ——燃料分数 H_u ——燃料低热值
下角标 $i = 1, 2$ 分别代表预混合燃烧和扩散燃烧阶段。

利用麦夸特法和通用全局优化法对放热率曲线进行数值拟合,算法参数设定为:收敛判断指标 1×10^{-5} ,最大迭代数 1 000,实时输出控制数 20,控制迭代数 20,收敛判断迭代数 15,进而得到 2 个燃烧持续角,2 个燃烧品质指数;1 个燃料分数和 1 个燃烧开始角,共 6 个参数。

拟合后发现同一工况可能对应多组双韦博公式参数,即产生多解现象。由于多解现象会降低后续神经网络预测的精度,因此为了避免这种现象发生,需要对各个参数的取值范围进行约束,根据所选机型和工况确定了双韦博公式中各参数的取值范围,如表 2 所示,表中的负号代表上止点前。

表 2 双韦博公式中参数的取值范围	
Tab.2 Parameters range of double Wiebe formula	
参数	数值
预混合燃烧开始角/°CA	-14 ~ 0
预混合燃烧持续角/°CA	10 ~ 20
预混合燃烧比例	0 ~ 0.3
预混合燃烧品质指数	0 ~ 3.5
扩散燃烧持续角/°CA	60 ~ 90
扩散燃烧品质指数	0 ~ 3.5

如果利用上面的约束仍然不能自动确定一组唯一的双韦博公式参数,则需要以实验数据为基础手动判断部分参数的取值,如燃烧开始角可用实测缸压曲线脱离纯压缩曲线的位置来确定,燃烧持续期可通过观察放热率曲线来确定,从而保证双韦博公式参数选取的唯一性。

2.3 神经网络的构建

由于柴油机机型的差异和韦博公式参数之间的非线性关系,导致难以用通用的数学模型描述韦博公式参数和柴油机工作过程参数之间的关系。考虑到径向基函数神经网络具有辨识能力强、学习效率高、收敛速度快、不易陷入局部极小状态等优点^[14],故利用径向基函数神经网络预测不同工况下的韦博公式参数。

径向基函数神经网络一般包括输入层、隐含层和输出层 3 层网络^[15],图 4 为由 n 个节点的输入层、 m 个节点的单隐层和 p 个节点的输出层组成的径向基函数神经网络。

输入层和隐含层之间的对应关系:隐含层节点

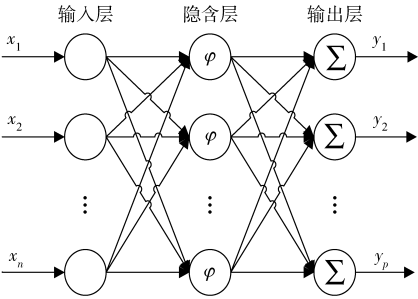


图 4 RBF 神经网络的结构

Fig. 4 Structure of RBF neural network

核函数对输入信号在局部区域产生响应,比较常用的基函数是高斯函数,即

$$y(q) = e^{-q^2} \tag{5}$$

在 RBF 神经网络的实际应用中,常采用中心向量 c_i 、宽度参数 σ_i 的高斯核函数^[16],即

$$\varphi(X, c_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|X - c_i\|^2\right) \tag{6}$$

式中 X ——输入样本,为一维向量

c_i ——中心向量,两者具有相同的维数

通过引入欧氏距离将一个多维空间中的预测问题转换成一个以欧氏距离为自变量的一维问题^[17]。

隐含层和输出层之间的对应关系:隐含层的输出实际代表的是输入样本 X 离开该隐节点的中心向量 c_i 的程度^[18],即

$$y_a = \sum_{i=1}^m \omega_{ia} \varphi(X, c_i) \tag{7}$$

式中 ω_{ia} ——隐含层到输出层的权值

y_a ——输出,为一维向量

因此,RBF 神经网络的训练任务,对隐含层来讲是选取 RBF 的中心向量,对输出层来讲则是权值矩阵的调整^[19]。最后,根据 RBF 神经网络的输入预测对应的输出。

本文建立神经网络的目的是预测不同工况下柴油机状态参数和韦博公式参数之间的对应关系,为了保证预测的准确性,需要选出与燃烧过程密切相关的柴油机运行参数作为神经网络的输入,考虑到实验用柴油机为机械供油式中冷发电用柴油机,且多个输入参数有利于加强神经网络输入与输出之间的相互关系,故选定小时耗油量、增压压力和压气机出口温度作为神经网络的输入,以便于神经网络预测模型能够根据柴油机不同的工况预测不同的韦博参数组合。

选取了负荷特性下(转速 1 500 r/min)45 个有效的工况点,分别测得柴油机在 45 个工况点下稳定运行时的压气机出口温度、增压压力、小时耗油量(作为神经网络的输入参数),并按照文中所指出的缸压曲线反推燃烧放热率、放热率曲线的数值拟合

等方法获取 45 个工况点对应的双韦博参数(作为神经网络的输出参数),从而确定神经网络在上述工况点下对应的输入和输出。从中抽取出 10 个代表性工况点作为检测样本,负荷范围 10% ~ 100%,而其他的 35 个工况点则作为神经网络的训练样本,并设定 7 个隐含层节点。

3 预测结果验证及动态仿真应用

3.1 预测精度分析

利用检测样本对神经网络的预测精度进行评价,常用于预测模型精度评价的指标有平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数 R^2 ,利用检测样本和上述 3 种评价指标分别对预测精度进行评价^[20],结果见表 3。 R^2 越接近 1,MAE、RMSE 越接近 0,表明模型预测效果越好,预测精度越高。

表 3 预测精度评价

Tab. 3 Prediction accuracy evaluation			
输出参数	R^2	MAE	RMSE
预混合燃烧开始角	0.97	0.04	0.04
预混合燃烧持续角	0.95	0.01	0.02
预混合燃烧比例	0.97	0.05	0.05
预混合燃烧品质指数	0.93	0.05	0.05
扩散燃烧持续角	0.93	0.01	0.01
扩散燃烧品质指数	0.93	0.04	0.04

由表 3 可见 6 个输出参数的 MAE、RMSE 都小于等于 0.05, R^2 均大于等于 0.93,证明了预测模型具有较高的预测精度和良好的适应性,能够保证柴油机的工作过程参数与韦博公式参数的准确对应。

3.2 预测结果验证

从检测样本点中选取 5 个工况点(表 4),将基于神经网络预测结果的燃烧放热率仿真曲线与由实测缸压反推的燃烧放热率曲线(光顺前)进行比较,如图 5 ~ 9 所示。

表 4 验证工况点

Tab. 4 Verified operation points				
序号	负荷/ %	油耗/ (g·(kW·h) ⁻¹)	输出功率/ kW	转速/ (r·min ⁻¹)
1	100	220.1	90.0	1 500
2	85	219.6	76.5	1 500
3	70	221.5	63.0	1 500
4	50	231.0	45.0	1 500
5	20	318.7	18.0	1 500

图 5 ~ 9 分别是额定转速下负荷为 100%、85%、70%、50%、20% 工况点处燃烧放热率仿真预测与实测曲线,可见预测曲线与仿真曲线吻合得比较好,证明了神经网络预测的正确性。

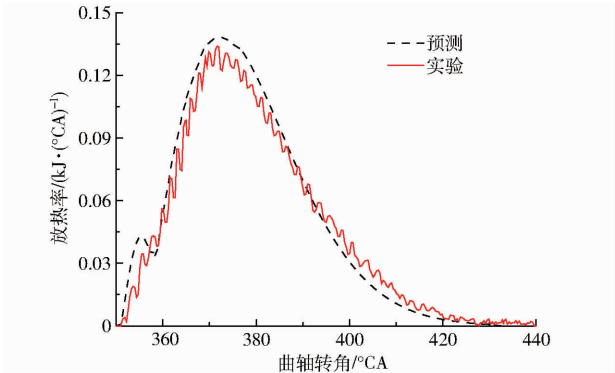


图 5 100% 负荷工况点放热率仿真值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison of simulated and measured values of heat release rate under 100% load condition

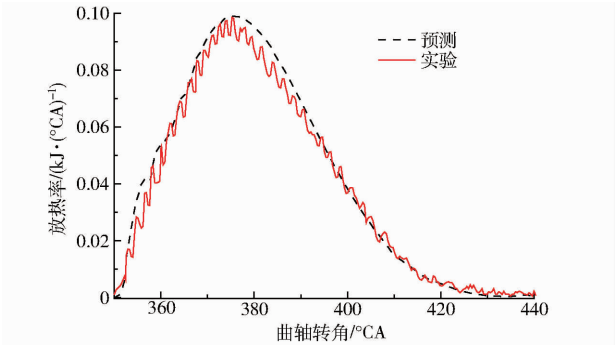


图 6 85% 负荷工况点放热率仿真值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of simulated and measured values of heat release rate under 85% load condition

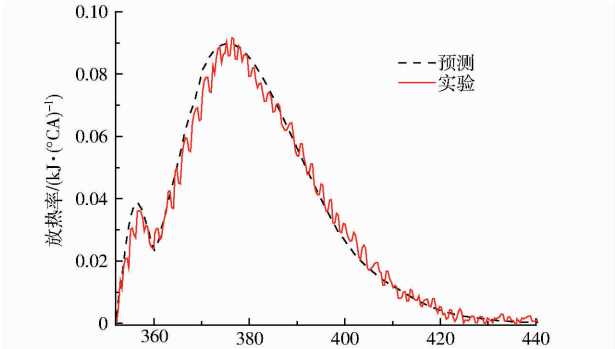


图 7 70% 负荷工况点放热率仿真值与实测值的比较

Fig. 7 Comparison of simulated and measured values of heat release rate under 70% load condition

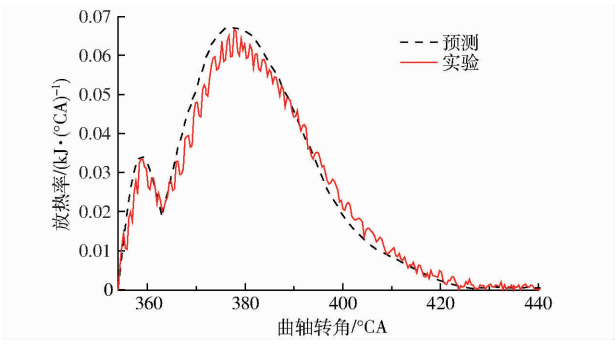


图 8 50% 负荷工况点放热率仿真值与实测值的比较

Fig. 8 Comparison of simulated and measured values of heat release rate under 50% load condition

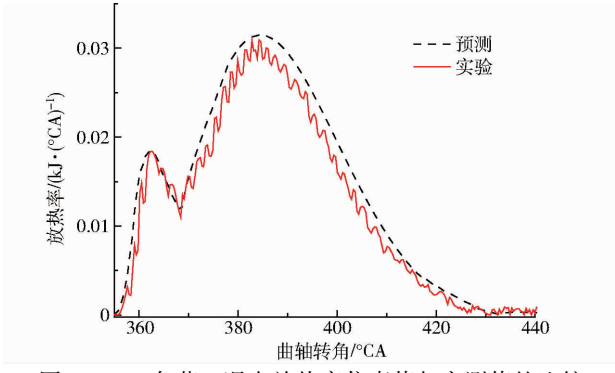


图 9 20% 负荷工况点放热率仿真值与实测值的比较

Fig. 9 Comparison of simulated and measured values of heat release rate under 20% load condition

3.3 动态仿真应用

以神经网络预测模型为核心,利用面向对象的物理建模思想和多领域统一物理建模规范 Modelica 语言,通过建立增压器、调速器等子模块,构建了基于神经网络的可进行韦博公式参数预测的 D4114B 型发电用柴油机整机模型,仿真研究了负荷特性下(转速 1 500 r/mim,在 20 s、40 s、60 s 改变负荷)柴油机的动态性能,为了证明这种预测方法在动态仿真中的准确性,将神经网络输入参数的动态仿真结果与稳定运行工况点的实验结果进行比较,如图 10 ~ 12 所示,相对误差如表 5 所示。

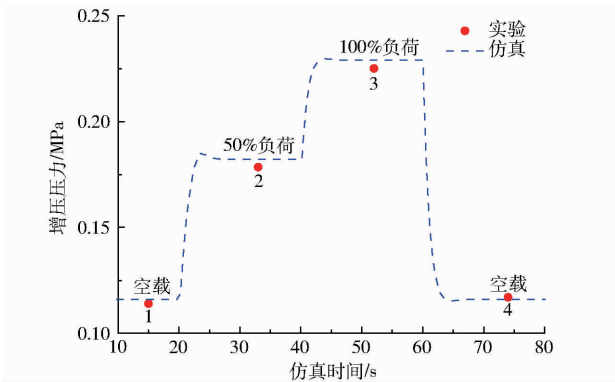


图 10 增压压力

Fig. 10 Boost pressure

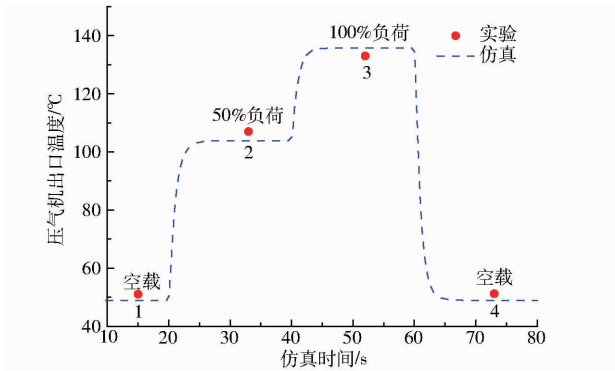


图 11 压气机出口温度

Fig. 11 Compressor outlet temperature

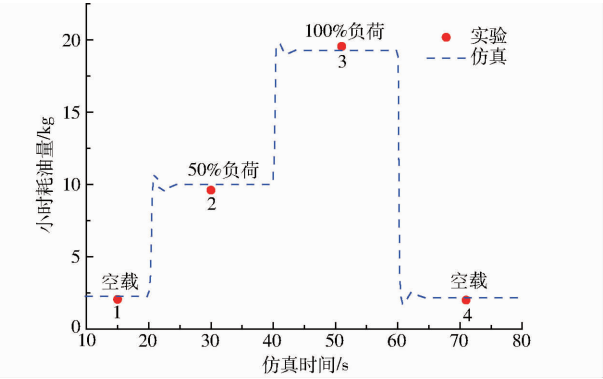


图 12 小时耗油量

Fig. 12 Hourly fuel consumption

表 5 相对误差

Tab. 5 Relative errors %

参数	序号			
	1	2	3	4
增压压力相对误差	1.75	1.92	1.73	1.52
压气机出口温度相对误差	4.16	2.96	2.00	4.43
小时耗油量相对误差	8.66	4.17	1.29	8.15

表 5 中的序号与图 10 ~ 12 中的散点序号对应,由图 10 ~ 12、表 5 可知,经神经网络预测韦博公式参数的模型的仿真值与稳定运行工况点的实测值吻合得较好,证明这种韦博公式参数预测方法在动态仿真中的准确性和有效性,可将其应用于柴油机的动态仿真。

4 结论

- (1) 鉴于传统韦博公式参数选取方式的不足,以 D4114B 型发电用柴油机为例,提出了一种基于神经网络的韦博公式参数预测方法。
- (2) 所建立的韦博公式参数预测模型的准确性较好,可将其用于柴油机的工作过程数值模拟。
- (3) 以基于神经网络的韦博公式参数预测方法为核心建立的柴油机整机模型的动态仿真精度较高,可将该方法用于柴油机的动态仿真研究。

参 考 文 献

1 周松,王银燕,明平剑. 内燃机工作过程仿真技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2012.

2 杨润泽. 基于零维模型的柴油机建模与仿真[J]. 内燃机,2014(1):8-10.
YANG Runze. Modeling and simulation of diesel engines based on zero-dimensional model[J]. Internal Combustion Engines, 2014(1):8-10. (in Chinese)

3 王贺春,王玥,徐荣,等. 核电应急柴油发电机组加载过程建模与仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(6):784-788.
WANG Hechun, WANG Yue, XU Rong, et al. Transient modeling and simulation of nuclear emergency diesel generators during the loading process[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(6):784-788. (in Chinese)

4 孙俊,涂环. 基于优化理论优选柴油机燃烧模型经验参数的方法研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,38(2):277-279.
SUN Jun, TU Huan. Research on the method of determining zero-dimensional model's empirical parameters based on optimization algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 38(2):277-279. (in Chinese)

5 SHAVER G M, ROELLE M J, GERDES J C. Modeling cycle-to-cycle dynamic and model transition in HCCI engines with variable valve actuation[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(3):213-222.

6 周俊杰,邱东,谢绍茂. 柴油机工作过程数值计算[M]. 大连:大连理工大学出版社,1990.

7 王宪成,胡俊彪,何星,等. 基于遗传算法的准维燃烧模型修正方法[J]. 装甲兵工程学院学报,2013,27(1):27-31.
WANG Xiancheng, HU Junbiao, HE Xing, et al. Quasi-dimensional combustion model updating method based on genetic algorithm[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2013, 27(1):27-31. (in Chinese)

8 何勇,裴正军,冯雷. 基于神经网络的柴油机技术状况评估仿真方法[J]. 农业机械学报,2002,33(5):1-3.
HE Yong, QIU Zhengjun, FENG Lei. A new approach to appraising working condition of a diesel engine based on artificial neural networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5):1-3. (in Chinese)

9 WINTERBONE D E, THIRUAROORAN C A. Wholly dynamic model of turbocharged diesel engine for transfer function evaluation [C]. SAE Paper 770124, 1977.

10 卢丰翥,黄豪中,杨如枝,等. 内燃机燃烧测试分析系统的设计与开发[J]. 中国测试,2014,40(1):83-87.
LU Fengzhu, HUANG Haozhong, YANG Ruzhi, et al. Development of combustion test and analysis system for internal combustion engine[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(1):83-87. (in Chinese)

11 WOSCHNI G. A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine [C]. SAE Paper 670931, 1967.

12 杜巍,赵庆隆,刘福水. 基于全缸缸压测量的柴油机机械效率[J]. 农业工程学报,2014,30(2):31-37.
DU Wei, ZHAO Qinglong, LIU Fushui. Mechanical efficiency of diesel engine based on pressure measurements of all cylinders [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2):31-37. (in Chinese)

13 王纪元. 柴油机工作过程的 Simulink 建模仿真研究[D]. 大连:大连理工大学,2008:26.
WANG Jiyuan. Research on modeling and simulation of working process of diesel engine based on Simulink[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008:26. (in Chinese)

14 张俊峰. RBF 神经网络在非线性系统辨识中的应用研究[J]. 仪器仪表与分析监测,2003(1):1-3.

- 15 王文杰,裴吉,袁寿其,等. 基于径向基神经网络的叶轮轴面投影图优化[J]. 农业机械学报,2015, 46(6):78-83.
WANG Wenjie, PEI Ji, YUAN Shouqi, et al. Optimization of impeller meridional shape based on radial basis neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):78-83. (in Chinese)
- 16 徐东辉,李岳林,解福泉,等. 基于混沌 RBF 神经网络的汽油机瞬态工况油膜参数辨识研究[J]. 内燃机工程,2015, 36(3):100-105.
XU Donghui, LI Yuelin, XIE Fuquan, et al. Study of oil film parameter identification in gasoline engine transient conditions based on chaos-RBF neural network[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(3): 100-105. (in Chinese)
- 17 Buhmann M. Radial basis function [J]. Acta Numerica, 2000, 9:1-38.
- 18 陈宁,赵丁选,张红彦,等. 基于径向基函数神经网络的工程车辆自动变速控制[J]. 农业机械学报,2005, 36(5):1-5.
CHEN Ning, ZHAO Dingxuan, ZHANG Hongyan, et al. Study on automatic transmission of a construction vehicle based on RBF neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5):1-5. (in Chinese)
- 19 许丽君. 基于神经网络的船舶柴油机故障诊断技术[D]. 镇江:江苏科技大学,2013:18.
XU Lijun. Fault diagnosis technology of marine diesel engine based on neural networks [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science of Technology, 2013:18. (in Chinese)
- 20 刘鹏,范立云,白云,等. 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析[J]. 农业工程学报,2015, 31(16):96-101.
LIU Peng, FAN Liyun, BAI Yun, et al. Modeling analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):96-101. (in Chinese)

(上接第 375 页)

- 8 AVL List GmbH. FIRE v-2011-lagrangian multiphase module [M]. Graz:AVL List GmbH, 2011.
- 9 刘传宝,颜伏伍,胡杰,等. 柴油机 SCR 后处理系统控制策略[J]. 农业机械学报,2013,44(11):6-11.
LIU Chuanbao, YAN Fuwu, HU Jie, et al. SCR post-processing system control strategy of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 6-11. (in Chinese)
- 10 ZUKERMANA R, VRADMANA L, HERSKOWITZA M, et al. Modeling and simulation of a smart catalytic converter combining NO_x storage ammonia production and SCR[J]. Chemical Engineering Journal, 2009,155(1):419-426.
- 11 马军彦,李君,曲大为,等. 柴油机 SCR 系统尿素分解效率研究[J]. 农业机械学报,2015,46(6):282-286,309.
MA Junyan, LI Jun, QU Dawei, et al. Urea decomposition efficiency of diesel engine SCR system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):282-286,309. (in Chinese)
- 12 STROTS V O, SANTHANAM S, ADELMAN B J, et al. Deposit formation in urea-SCR[C]. SAE Paper 2009-01-2780, 2009.
- 13 冯向宇,葛蕴珊,马朝臣,等. 柴油机尿素 SCR 沉积物成因研究[J]. 内燃机工程,2014,35(6):1-6.
FENG Xiangyu, GE Yunshan, MA Chaochen, et al. Study on deposit formation in urea-SCR system of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6):1-6. (in Chinese)
- 14 ZHENG G, FILA A, KOTRBA A, et al. Investigation of urea deposits in urea SCR system for medium and heavy duty trucks [C]. SAE Paper 2010-01-1941,2010.
- 15 余皎,王军,佟德辉. 重型柴油机 SCR 系统布置优化设计[J]. 内燃机与动力装置,2010(4):25-29.
YU Jiao, WANG Jun, TONG Dehui, et al. Configuration optimization of the SCR system for a heavy duty diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Power Plant,2010(4):25-29. (in Chinese)
- 16 王谦,亓平,周明星,等. 车用柴油机选择性催化还原技术的试验研究 [J]. 小型内燃机与摩托车,2012(3):84-88.
WANG Qian, QI Ping, ZHOU Mingxing, et al. An experimental research on selective catalytic reduction technology for vehicular diesel engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012(3):84-88. (in Chinese)
- 17 KOEBEL M, STRUTZ E O. Thermal and hydrolytic decomposition of urea for automotive selective catalytic reduction systems: thermo chemical and practical aspects[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003,42(12):2093-2100.
- 18 华伦,赵彦光,胡静,等. 空气辅助和无空气辅助 SCR 系统尿素喷雾特性的对比试验研究[J]. 汽车工程,2013,35(3):197-201.
HUA Lun, ZHAO Yanguang, HU Jing, et al. A comparative experimental study on the urea spray characteristics in SCR systems w/wo air assistance[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3):197-201. (in Chinese)
- 19 龚金科,张福杰,鄂加强,等. 柴油机 SCR 催化剂载体结构参数优化[J]. 环境工程学报,2012,6(12):4573-4577.
GONG Jinke, ZHANG Fujie, E Jiaqiang, et al. Optimization structural parameters of diesel SCR catalytic reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012,6(12):4573-4577. (in Chinese)
- 20 BYUNG-CHUL Choi, YOUNG Kwon Kim, WOO-NAM Jhung, et al. Experimental investigation on melting characteristics of frozen urea-water-solutions of a diesel SCR de-NO_x-system[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1):1235-1245.
- 21 MASSIMO Colombo, ISABELLA Nova, ENRICO Tronconi, et al. Mathematical modeling of cold start effects over zeolite SCR catalysts for exhaust gas after treatment[J]. Catalysis Today, 2014,231:99-104.