

## 生物燃油/柴油混合乳化燃料制取参数的优化研究

王述洋, 苏君

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为方便快捷的寻找生物燃油/柴油混合乳化燃料的最佳超声乳化制备参数, 将超声乳化燃料制取的实验数据作为样本数据, 构建乳化燃料稳定性的人工神经网络预测模型。利用建立的非线性神经网络预测模型作为种群个体的适应度函数, 建立混合乳化燃料制备参数的遗传算法寻优模型, 通过遗传算法模拟自然进化过程随机、自适应搜索的方式确定乳化燃料生产制取的最佳乳化超声参数(超声波频率、功率、作用时间和矩形脉冲占空比)。按该参数进行试验, 其试验数值与计算数值相符合。结果表明, 运用混合乳化燃料预测模型及遗传算法优化模型能够准确设计出稳定性能较好混合乳化燃料制取的超声乳化参数, 为混合乳化燃料的制备提供了一种新的优选方式。

**关键词:** 生物燃油/柴油; BP神经网络; 遗传算法; 预测模型

中图分类号: S210.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2015)04-0632-06

### Parameter optimization for the stability of bio-oil / diesel emulsion fuel

WANG Shuyang, SU Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

**Abstract:** In order to optimize bio-oil / diesel mixing ultrasound parameters for the emulsion fuel emulsification, an emulsion fuel artificial neural network prediction model was established using the neural network training sample data obtained from experiments. The best fuel ultrasonic emulsification parameters (ultrasonic frequency, power duration of action and incentive wave form) were identified using the genetic algorithm that simulated a natural evolutionary process using randomized adaptive search method. A test was conducted determine the consistency of the parameters between the experimental and calculated numerical data. The results showed that use of the mixed emulsion fuel prediction model and the genetic algorithm optimization model can accurately design ultrasonic emulsification parameters with a good mix stability for fuel preparation, which could provide a new preferred mode for preparing the mixed emulsion fuel.

**Key words:** bio-oil / diesel; BP neural network; GA; prediction model

生物物质能源的高效合理利用是解决我国能源问题的重要措施之一, 但由于生物质体积能量密度低, 直接用到工业领域受到了较大的限制。将生物质通过闪速裂解可制取易于储存、运输的清洁环保燃料——生物燃油<sup>[1]</sup>。生物燃油也可广泛应用到非内燃机燃料领域, 如有色冶金、陶瓷、水泥、玻璃和石灰等工业炉窑<sup>[2]</sup>, 但由于生物燃油和矿产石油相比具有含氧量高、热值低、偏酸等缺点, 很难直接用作一般内燃机燃料<sup>[3-4]</sup>。若要用作内燃机燃料, 需要对其进行提质、改性、升级处理, 改善生

物燃油特性, 但其成本在现阶段非常昂贵<sup>[5]</sup>。在不是非常苛刻的场合, 可采取更经济、简捷的方法: 将一定比例的生物燃油与柴油相混, 制成生物燃油/柴油混合乳化燃料, 可有效地降低生物燃油的酸性、粘度, 并能提高其热值, 从而可广泛的应用于普通柴油发动机上<sup>[6-8]</sup>。

生物燃油/柴油混合乳化燃料的超声制取是一个复杂的物理、化学反应过程, 混合乳化燃料的稳定性受多种因素的影响, 并且各因素间具有显著的耦合性, 对一个指标的调整势必影响到其他的指标,

收稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA05Z400, 863 计划)资助。

作者简介: 苏君, 硕士研究生。E-mail: 609673220@qq.com

\* 通信作者: 王述洋, 教授, 博士生导师。E-mail: 1500233990@qq.com

例如提高超声乳化时间,增加输入乳化液体的能量,从而影响制取乳化燃料稳定性,因此需改变超声乳化的功率,调整输入液体燃料能量<sup>[9]</sup>。乳化燃料的稳定性多依靠离线测量,如浊度法、粒径测量和稳定时间等人工观察的方法获得<sup>[10-11]</sup>。混合乳化燃料的稳定性与其影响因素是一种复杂的非线性关系,且混合乳化燃料的稳定期观察时间长,系统的大滞后及非线性使得难以运用机理分析法和系统辨识等方法建立实用的混合乳化燃料稳定模型。

人工神经网络具有较强的容错性、辨识和逼近任意复杂非线性系统的能力,避免了常规方法中脱离实际的简化,采用神经网络优选超声乳化参数是一种有效的方法,但由于输入参数较多,样本数据大,使得计算工作量较大。遗传算法是基于自然选择和群体遗传机制的随机优化算法,是一种有效的全局优化方法。作者将遗传算法与神经网络进行结合,建立以乳化超声参数为输入,混合乳化燃料的稳定性为输出的神经网络结构模型,并将其作为种群个体的适应度函数,通过遗传算法进行全局寻优,确定最佳的超声乳化参数,为制备稳定性较高的生物燃油/柴油混合乳化燃料奠定了基础。

## 1 生物燃油/柴油混合乳化燃料超声制取

### 1.1 实验材料

生物燃油是由东北林业大学生物质能技术工程中心通过自主研发的斜板槽式低能耗快速裂解制油装置制取的,原料为玉米秸秆,粒径为 1.2 mm 以下,裂解温度为 500~600℃之间;柴油为市场购买的 0#柴油。生物燃油及柴油的性质如表 1 所示。

表 1 生物燃油及 0#柴油的主要参数

Table 1 The performance of bio-oil and 0#diesel

名称 Name	生物燃油 Bio-oil	0#柴油 Diesel
pH 值	4.5	6.5
热值/MJ·kg <sup>-1</sup> Calorific value	17.91	40.18
密度/kg·m <sup>-3</sup> Density	1.032	0.829
运动粘度/m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> Kinematic viscosity	10.3	6.5

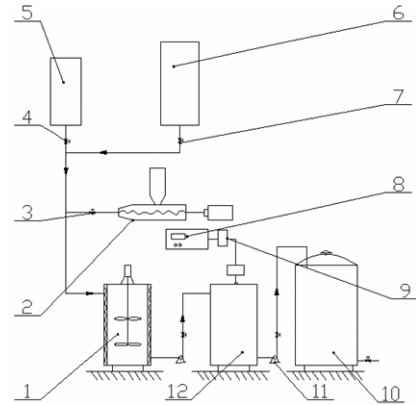
### 1.2 实验仪器

可控因素超声乳化发生器(东北林业大学自主研发)、JY88-II 超声波细胞粉碎机、TDL-40C 低速台式离心机和 SHZ-D(III)循环水式真空泵,图 1 为生物燃油/柴油混合乳化燃料超声制取装置示意图。

### 1.3 实验步骤

将一定温度下的 0#柴油与生物燃油按照一定的比例充入到混合搅拌罐中,启动搅拌机以一定

转速搅拌乳化一定时间。取 40 ml 的混合搅拌的初乳化燃料充入到超声乳化罐中,按照不同参数的超声波,乳化初乳液。将不同参数的超声制取的乳化燃料各存放 5 个样本。混合乳化燃料样本存放在室温下,每隔 2 h 观察记录 1 次,将 5 个试管中的 3 个试管开始分相的时间作为该项参数下的乳化燃料的稳定时间。



1.加热搅拌装置; 2.乳化剂进料装置; 3.乳化剂电磁阀; 4.生物燃油电磁阀; 5.生物燃油储存罐; 6.柴油储存罐; 7.柴油电磁阀; 8.可控因素超声乳化发生器; 9.功率放大器; 10.生物燃油/柴油混合乳化成品燃料; 11.油泵; 12.超声激励装置

1.Heating and stirring device; 2.Emulsifier feeder; 3.Emulsifier solenoid valve; 4.Bio-oil solenoid valve; 5.Bio-oil storage tanks; 6.Diesel storage tanks; 7. Diesel solenoid valve; 8.Controllable factors phacoemulsification generator; 9. Power amplifier; 10. Biodiesel / diesel mixed emulsion finished fuel; 11. Pump; 12.Ultrasonic excitation means

图 1 生物燃油/柴油混合乳化燃料超声制取装置示意图  
Figure 1 Schematic of bio-oil / diesel fuel mixed emulsion preparation

## 2 混合乳化各原料比例的神经网络预测模型

### 2.1 模型结构和算法

模型结构采用应用最为普遍的 3 层前馈网络模型,主要包括输入层、隐含层和输出层,给定  $N$  个样本数据的输入/输出对,计算网络的输出。设第  $P$  组样本输入  $u_p=[u_{1p},u_{2p},u_{3p},\dots,u_{np}]^T$ ; 输出  $d_p=[d_{1p},d_{2p},d_{3p},\dots,d_{np}]$ , 其中  $p=1,2,\dots,N$ 。

神经元  $i$  在第  $p$  个样本数据输入时,神经元的输出  $y_{ip}$ , 即:

$$y_{ip} = f(u_p) = \sum_i^n (w_{ji}x_i - \theta_i) \quad (1)$$

$f(x)$ 取可微的 S 性激励函数:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

可由输入层经隐层至输出层,求得乳化燃料预测的稳定性。

网络训练的目标误差函数为

$$E = \frac{1}{2} N \sum (d_p - y_p)^2 \quad (3)$$

式中,  $N$  为样本数量,  $d_p$  为样本输出,  $y_p$  为计算输出。

**2.1.1 输入参数的确定** 超声乳化利用超声波空化效应来实现的, 影响超声波化学反应的主要因素就是对空化泡的形成及破裂有影响的因素, 主要包括频率、功率、反应时间、激励波形等。确定超声波频率、功率、作用时间和激励波形作为 BP 网络的输入, 因此网络输入层的神经元有 4 个, 输出为乳化燃料的稳定时间。

(1) 超声波频率。超声波作用于混合液体时, 会产生空化效应。超声波的频率影响着超声波空化阈值, 当超声波频率较高时, 空化阈值较高, 产生空化需要的声强或声功率就越大; 超声波频率较低时, 超声波空化效应的压缩和稀疏作用有较长时间间隔, 空化容易产生。

(2) 超声乳化的作用时间。适当的乳化温度能使生物燃油、柴油和乳化剂之间相互的溶解度增加, 同时增加混合液体的分子动能, 降低粘度, 使混合液体更易乳化, 同时能够提高乳化稳定性。但乳化温度过高又致使混合液体内部分子运动速度过大, 影响乳化剂界面吸附, 加大了液体分子之间碰撞和聚集, 不利于混合乳化燃料的稳定。超声空化时会产生大量的热量, 导致混合乳化燃料的温度急剧上升, 因此, 需控制超声波的作用时间

(3) 超声乳化的功率。在一定超声波功率范围内, 提高超声波的功率会使混合液体内的空化效应增强, 乳化液质量较好, 但超过一定功率, 空化泡在超声波的膨胀相内增长过大, 以致在压缩相内来不及发生崩溃, 影响超声乳化效果。

(4) 超声波矩形脉冲占空比。超声波占空比是指超声波实际发射超声波信号的时间与不发射超声波信号的时间比值。超声空化效应发生在超声波发射超声信号期间, 所以, 增加占空比可以延长超声波实际发射超声波信号的时间, 从而增强空化效应。

**2.1.2 隐层节点的确定** 在一定范围内, 用含有一个隐层的 BP 网络可以完成任意  $n$  维到  $m$  维的映射, 隐层节点数目的确定只能根据经验公式来选取<sup>[12]</sup>:

$$n = \sqrt{m+l} + a \quad (4)$$

式中,  $n$  为隐层节点的数目;  $m$  为影响乳化燃料质量的因素, 即输入层节点的数目;  $l$  为输出层节点数目, 模型中为稳定性时间;  $a$  为 1~10 之间的常数; 参考公式确定节点数的大致范围, 然后利用试凑法

确定最佳的节点数)。

隐层节点数一般不少于输入层和输出层的节点数, 隐层节点数越多, 网络的预测效果越好, 但隐层节点数目过多会虽然能够使得神经网络的训练误差减小, 但训练容易陷入局部极小点而得不到最优解, 本文将隐层节点数取为 11。

**2.1.3 激励函数的确定** 为方便处理数据, 将样本数据稳定在 [0,1] 之间, 本工作网络将隐层激励函数取为正切 S 型 'tansig()', 可以处理和逼近非线性的输入输出关系; 将输出层激励函数采用线性传递函数 'purelin()', 只要隐含层神经元个数适中, 神经网络可输出任意值。

根据以上分析, 模型的结构已经确定, 一个 3 层 BP 网络模型, 包含 4 个输入节点, 分别代表调整超声波频率  $f$ 、超声波功率  $P$ 、超声波作用时间  $t$  和超声波矩形波占空比  $u$ ; 一个输出节点, 代表乳化燃料的稳定时间; 11 个用来保证网络计算精度的隐层节点。模型输入层与隐层的连接全是一个  $4 \times 11$  阶矩阵, 隐层与输出层的连接权是一个含有 11 个元素的向量。

输入层为 4 个, 隐含层为 11 个, 输出层为 1 个, 即采用 4-11-1 型 3 层 BP 结构, 如图 2 所示。

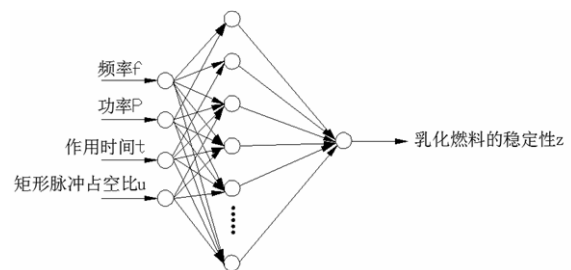


图 2 混合乳化燃料的神经网络预测模型结构

Figure 2 Neural network prediction model structure of mixed emulsion fuel

## 2.2 确定训练样本数据

神经网络模型的仿真准确度与所选择的训练样本密切相关。为保证训练结果的准确性, 使用正交实验法设计样本进行实验, 得到混合乳化燃料的稳定性值, 样本数据如表 2 所示。

## 2.3 样本数据网络训练与检测

从实验表中随机选取 2、6 和 14 号作为试验样本, 其余则为训练样本进行训练。网络训练完毕后, 检验样本检验训练结果, 将实验样本网络预测值和实验样本值的实际输出值之间的误差作为检验标准, 其误差如图 3 所示。

表 2 样本训练数据

Table 2 Training data

实验序号 No.	超声波频率/kHz Ultrasonic frequency	超声波功率/kW Ultrasonic power	作用时间/min Ultrasonic time	矩形占空比 Rectangular duty cycles	稳定时间 ESI/h Stabilization time
1	28	40	5	0.5	84
2	44	40	5	0.5	82
3	28	80	5	0.5	91
4	44	80	5	0.5	93
5	28	40	11	0.5	113
6	44	40	11	0.5	114
7	28	80	11	0.5	120
8	44	80	11	0.5	120
9	28	40	5	0.7	85
10	28	80	5	0.7	101
11	44	80	5	0.7	88
12	28	40	11	0.7	108
13	44	40	11	0.7	111
14	28	80	11	0.7	132
15	44	80	11	0.7	115
16	20	60	8	0.6	132
17	52	60	8	0.6	104
18	36	20	8	0.6	93
19	36	100	8	0.6	88
20	36	60	2	0.6	42
21	36	60	14	0.6	102
22	36	60	8	0.4	100
23	36	60	8	0.8	124
24	36	60	8	0.6	115
25	36	60	8	0.6	115
26	36	60	8	0.6	114
27	36	60	8	0.6	117
28	36	60	8	0.6	117
29	36	60	8	0.6	113

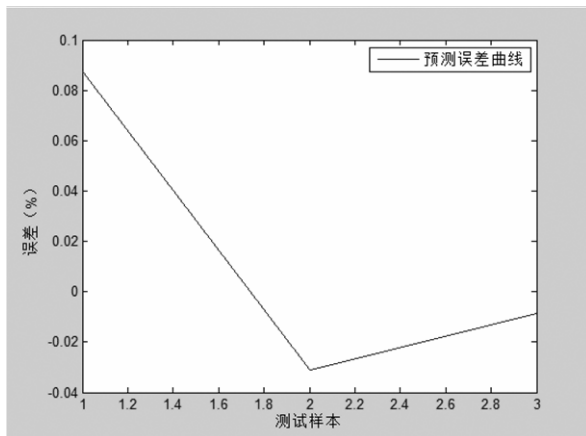


图 3 神经网络预测误差曲线

Figure 3 Neural network prediction of error curves

### 3 混合乳化各原料比例的工艺参数的优化

在乳化燃料生产中, 调整超声波频率  $f$ 、超声波

功率  $P$ 、超声波作用时间  $t$  和超声波矩形波占空比  $u$  中的任意一个因素都能够影响乳化燃料的稳定性。

遗传算法优化模型描述如下, 目标函数:

$$\text{Max} z = f(f, P, u, t) \quad (5)$$

式中,  $z$  为乳化燃料的稳定时间;

约束条件:

$$\begin{cases} 20 \text{ kHz} \leq f \leq 60 \text{ kHz} \\ 20 \text{ kW} \leq P \leq 100 \text{ kW} \\ 0.2 \leq u \leq 0.8 \\ 1 \text{ min} \leq t \leq 15 \text{ min} \end{cases}$$

遗传算法的具体步骤:

(1) 编码方式。编码的方式影响着遗传算子的运算方法和运行效率。采用遗传算法表现型最常用的二进制编码方式, 使确定的规模种群包含尽可能多的模式。

(2) 初始群体的生成。在约束条件的范围内,

随机的产生 80 个个体，作为初始种群  $P(0)$ 。设置进化代数数为  $mgen=500$ ，进化代数计数  $gen=0$ 。

(3) 适应度值评价检测。适应度函数值越高表明个体的越好，越接近最优解。用神经网络预测模型计算出来的乳化燃料的稳定值作为评价优劣的标准值，计算每个个体的适应值  $f$ 。

(4) 选择。从当前群体中选出优良个体，使得它们有机会遗传到下一代群体。

(5) 交叉操作。通过交叉操作可以得到新一代个体，新个体组合父辈个体特性，以交叉概率交换它们之间的部分染色体。

(6) 变异操作。随机地选取种群中的一个个体，根据变异概率改变某一个或某一些基因座的基因值为其他的等位基因，使一些个体编码串口发生变异，得到下一代群体  $P(t+1)$ 。

(7) 终止条件判断。若  $gen \leq mgen$ ，则  $gen=gen+1$ ，转到步骤 (2)，使得种群始终向着优化的方向移动；否则以进化过程中所得到的最大适应度的个体作为最优解输出。

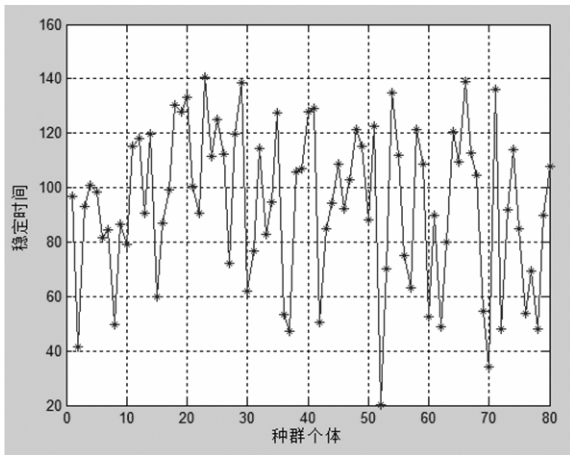


图 4 初始种群个体的稳定时间

Figure 4 Stabilization time of initial population of individuals

种群规模一般是  $N=20\sim 150$ ，若  $N$  太小，遗传算法优化效果找不到问题的解，因为种群数目不能够提供足够的采样点，而  $N$  太大则会增加计算量，增长收敛时间，本文取为 80；交叉概率  $p_c=0.5\sim 1$ ，杂交概率的增大可以加速收敛到最优解区域，但过大可能导致收敛于同一个解，本文取为 0.6，同时也会使高度适应值的结构很快被破坏，但杂交概率过小，会使搜索停滞不前；变异概率  $p_m=0.001\sim 0.05$ ，变异概率  $p_m$  是增大种群多样性的影响因素，当  $p_m$  过小时，不会产生新的染色体，但  $p_m$  过大时会导致遗传算法转变为随机搜索，因此增加了样本模式的

多样性，并有可能导致不稳定。图 4 为初始种群的稳定时间分布，可知初始种群的稳定时间总体水平较低。

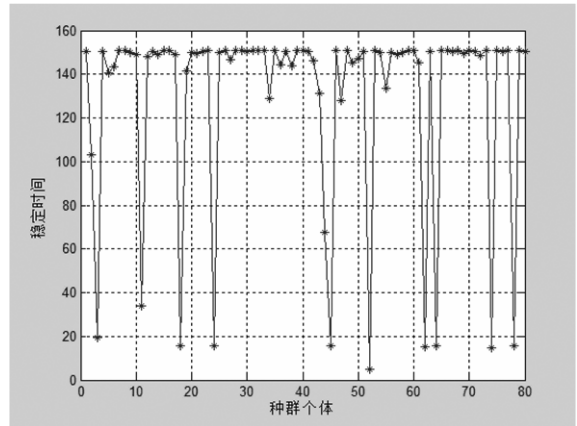


图 5 迭代 500 次优化的种群个体的稳定时间

Figure 5 Stabilization time of 500 iterations for optimizing individual populations

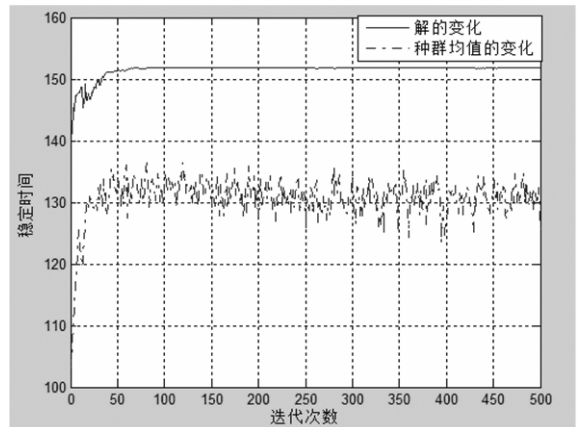


图 6 经过 500 次迭代后优化解的稳定时间

Figure 6 Stabilization time after 500 iterations for optimizing solutions

采用上述算法繁殖 500 代，图 5 为迭代 500 次优化后种群的稳定时间分布，由图 5 可看出遗传到 500 代时，种群中的多数个体的稳定时间较多的分布在最优解。迭代 500 次的过程中，种群的稳定时间的平均值在迭代的前部分有较快的增长，并逐渐在一定的范围内波动，最佳稳定时间较快的保持不变，如图 6 所示。最终优化结果为超声波频率  $f=28$  kHz、超声波功率  $P=65$  W、超声波作用时间  $t=15$  min 和超声波矩形波占空比  $u=0.5$ ，得到的稳定时间为 151.7 h，并采用优化参数进行试验，所得到的乳化燃料经稳定性检测，质量符合要求，混合乳化燃料的稳定时间得到很好的优化改善。

## 4 结论

建立 4-11-1 3 层结构的 BP 神经网络预测模型, 经检测预测结果误差小于 9%, 说明神经网络的预测模型准确、可靠, 可作为生物燃油/柴油混合乳化燃料制取的工艺参数优化的依据。以建立的神经网络预测模型作为适应度函数, 应用遗传算法对混合乳化燃料的工艺参数进行优化, 解决了训练数据的模糊及数据噪声, 避免了对每个执行的定量评价, 提高系统性能。优化后的最佳超声参数为超声波频率  $f=28$  KHZ、超声波功率  $P=65$  kW、超声波作用时间  $t=15$  min 和超声波矩形波占空比  $\mu=0.5$ , 该超声参数下的稳定时间为 151.7 h, 比样本试验中最高稳定时间高 15%, 同时最佳工艺参数下的预测值与试验数值相符合, 实现了超声乳化燃料制取的超声波参数的优化, 为生物燃油/柴油混合乳化燃料的制备最优参数选择提供了一条新方法。

## 参考文献:

- [1] 曾其良, 王述洋, 徐凯宏. 典型生物质快速热解工艺流程及其性能评价[J]. 森林工程, 2008(3): 47-50.
- [2] 吴娟, 柏雪源. 生物质油/柴油乳化燃料的研究进展[J]. 科技信息: 科学教研, 2007, 24: 325-326.
- [3] 韩旭东, 黄勇成, 易延洪, 等. 玉米秸秆生物油对直喷式柴油机燃烧与排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2012(3): 248-255.
- [4] 齐国利, 董芑, 范凤博, 等. 生物质热解油及乳化油特性的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 92-94.
- [5] 刘荣厚, 黄彩霞, 蔡均猛, 等. 生物质热裂解生物油精制研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 308-312.
- [6] 孙书生, 张健, 李文志, 等. 生物油/柴油乳化燃料用于柴油机的试验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1718-1722.
- [7] Chiamonti D, Bonini M, Fratini E, et al. Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines-Part 1: emulsion production[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(1): 85-89.
- [8] Ikura M, Stanculescu M, Hogan E. Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 24(3): 221-232.
- [9] 魏晓莉, 王述洋, 王卓. 超声乳化生物质柴油稳定性研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 102-106.
- [10] 王丽红, 吴娟, 易维明, 等. 玉米秸秆粉热解生物油的分析及乳化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 204-209.
- [11] 王黎明, 王述洋. 生物燃油/柴油乳化燃油的理化特性研究[J]. 太阳能学报, 2008, 5(5): 536-538.
- [12] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 9-10.