doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.042

拖拉机作业载荷数据平台设计与旋耕作业质量预测

温昌凯[1,2]　谢　斌[1,2]　李若晨[1,2]　宋正河[1,2]　韩建刚[3]　刘江辉[3]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 洛阳西苑车辆与动力检验所有限公司, 洛阳 471000)

摘要: 针对拖拉机田间试验数据不足、机组作业质量无法实时评估与准确预测的问题,设计了涵盖多参数、多工况的车载测试终端,构建了全国范围的田间作业试验拖拉机作业载荷数据平台系统,以获取拖拉机各关键零部件的田间作业载荷数据。在此基础上,研究了准确预测、评价拖拉机田间旋耕作业质量的智能算法,为产品研发、性能预测以及作业评估提供全面的基础数据与可靠的预测结果。基于农业大数据,融合 BP 神经网络与遗传算法对数据平台基础作业载荷进行分类挖掘,预测评价了拖拉机田间旋耕作业质量,结果表明,基于遗传算法的神经网络预测精度高达 96.77%,均方根误差(RMSE)小于 0.01,说明拖拉机作业载荷数据平台的基于遗传算法的神经网络预测模型可准确预测评价拖拉机田间旋耕工况的作业质量。

关键词: 拖拉机; 作业载荷数据平台; 作业质量; 预测
中图分类号: S24; S219.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0372-10　　**OSID**:

Construction of Tractor Working Load Data Platform and Prediction of Rotary Tillage Quality

WEN Changkai[1,2]　XIE Bin[1,2]　LI Ruochen[1,2]　SONG Zhenghe[1,2]　HAN Jian'gang[3]　LIU Jianghui[3]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Luoyang Xiyuan Vehicle and Power Inspection Institute Co.*, *Ltd.*, *Luoyang* 471000, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient field test data of tractors and inaccurate real-time evaluation and prediction of unit performance and agronomy, a vehicle-borne test terminal covering multi-parameters and multi-working conditions was built, and a data platform for tractor operation load was established to obtain field operation load data of key parts of tractors. Based on this platform, the field operation load data of key parts and key parts of tractors were obtained. On this basis, the intelligent algorithm for reliable real-time prediction and evaluation of tractor traction performance was studied, which provided comprehensive basic data and effective prediction algorithm for product development, performance prediction and operation evaluation. Firstly, the operation parameters and structure system of the vehicle test terminal were introduced. Then, the tractor operation load data platform based on the field operation test nationwide was designed and built. Finally, based on the large agricultural data, the BP neural network and genetic algorithm were combined to classify and mine the basic working load of the data platform. The traction performance of tractor rotary tillage was predicted and evaluated. The results showed that the prediction accuracy of the neural network based on genetic algorithm was as high as 96.77%, and the root mean square error (RMSE) was less than 0.01, which showed that the prediction accuracy of the neural network based on genetic algorithm was as high as 96.77%. Neural network algorithm based on genetic algorithm can accurately and reliably evaluate and predict traction performance of tractor rotary tillage operation.

Key words: tractor; work load data platform; operation quality; prediction

收稿日期: 2019-11-04　修回日期: 2019-12-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700300)
作者简介: 温昌凯(1994—),男,博士生,主要从事农业装备智能化及农业机械可靠性研究,E-mail: 18813003909@163.com
通信作者: 谢斌(1973—),男,副教授,主要从事农业装备智能化、电液控制和车辆电控研究,E-mail: xiebincau@126.com

0　引言

农业与大数据良好结合是未来农业发展的必然趋势。农业大数据涉及地区范围广、地形差别大、作物品种多、作业工况多，并且受限于各地区农业结构复杂、农耕环境以及气候多样等因素，因此，农业领域大数据具有高实时、多维度、离散化、难综合分析等特点[1-3]。

随着全球农业现代化、智能化、信息化的不断推进，畜牧业、渔业、农产品加工、气象等农业相关领域数据呈指数规律不断积累[4-8]。但在农业机械领域，由于农业机械载荷复杂、测试成本较高以及数据平台架构不易统一等问题，数据系统性积累与平台规范化构建难以实现，农业数据测试以及积累研究相对滞后，基于大数据的农业机械数据融合与分析预测相对缺乏。

本文研究拖拉机作业载荷数据平台系统构建和基于大数据的拖拉机田间旋耕作业质量评价与预测。探索拖拉机多传感器车载测试终端分布格局、作业参数与结构体系；研究基于全国范围田间作业试验的拖拉机作业载荷数据平台系统，并构建相应的数据库结构；基于农机农艺要求，采用遗传算法与 BP 神经网络相融合的方法对数据平台基础作业载荷进行分类融合处理，预测评价拖拉机田间旋耕作业质量，以验证平台系统的可行性。

1　样机测试终端结构体系

1.1　测试终端布局

此次全国范围的测试样机布置以涵盖水稻、小麦、玉米等优势作物的全国农业战略格局为出发点，主要考虑优势主产区的作物差异性、地理环境差异性以及作业载荷差异性，在一定程度上兼顾其他具有代表性的地块地域[9-11]。

因此，综合考虑测试终端地区分配合理，兼顾各地区作物、地理、气候等多个因素，测试样机车载终端布置选择主要集中在东北平原、黄淮海平原、长江流域、汾渭平原以及新疆地区，总计 6 辆测试样机。

1.2　测试终端功能架构

测试样机车载终端硬件以基于 ARM335x 微处理器的 ARM 硬件开发平台作为主控制器，使用分布式布置的传感器，对拖拉机多地区、多工况、多载荷进行数据采集。田间作业载荷采集测试终端采用 OK3355xD 工业级开发板和 FET335xD 工业级核心板，配置 LCD 触摸液晶屏、WiFi 模块、SD 卡、USB 键盘鼠标接口、多接口模块，测试终端硬件结构设计如图 1 所示。

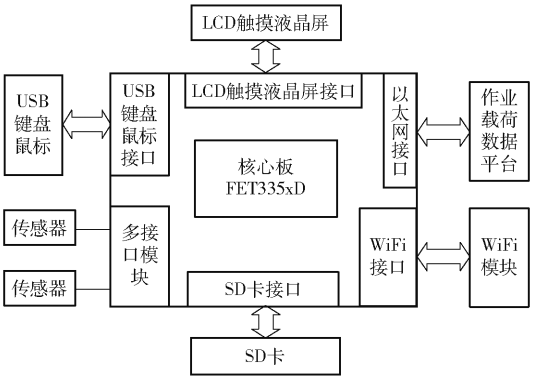


图 1　测试终端硬件结构框图

Fig. 1　Hardware structure design of test terminal

测试样机车载终端的测试工况包括拖拉机犁耕作业、旋耕作业、深松作业以及联合耕整作业，待测关键零部件包括发动机、实时地理位置、电液悬挂下拉杆、动力输出轴、前万向传动轴、前转向驱动桥、变速箱、后驱动桥、驾驶室等，测试参数以及配套传感器如表 1 所示，传感器布置位置如图 2 所示。

表 1　测试终端测试参数与传感器

Tab. 1　Testing terminal test parameters and sensors

测试对象	传感器	测试参数
发动机	温度传感器	冷却水温度
	转速传感器	发动机转速
	油耗传感器	实时油耗
实时地理位置	GNSS 定位模块	经度
		纬度
		驾驶速度
电液悬挂下拉杆	销轴传感器	左下拉杆销轴力
		右下拉杆销轴力
	角度传感器	左下拉杆角度
		右下拉杆角度
前十字万向轴	扭矩传感器	扭矩
动力输出轴	扭矩传感器	扭矩
前转向驱动桥	应变片	应力
	振动传感器	振动加速度
变速箱	应变片	应力
	振动传感器	振动加速度
后驱动桥	应变片	应力
	振动传感器	振动加速度
驾驶室	振动传感器	底板振动加速度
		座椅振动加速度

各测试样机正常田间作业，测试终端开启后可自动采集作业载荷，按照拖拉机作业载荷传输协议实时或分段工作数据打包等多种形式发送传输至作业载荷数据库，实现拖拉机多样工况、恶劣环境条件下的田间作业载荷数据的自动采集与传输。

2　拖拉机作业载荷数据平台系统分析

2.1　需求分析

参考国内外现有机械行业数据平台，结合农业



图 2 测试终端传感器布置图

Fig. 2 Sensor layout of test terminal

机械田间作业多工况、变环境、高载荷的特点，设计基于 B/S 网络结构模式的拖拉机作业载荷数据库系统。本系统包括系统管理机制、载荷数据库基础平台、载荷数据实时采集系统以及拖拉机田间旋耕工况作业质量评价与预测模块等部分，在此基础上，形成的系统总体方案如图 3 所示。

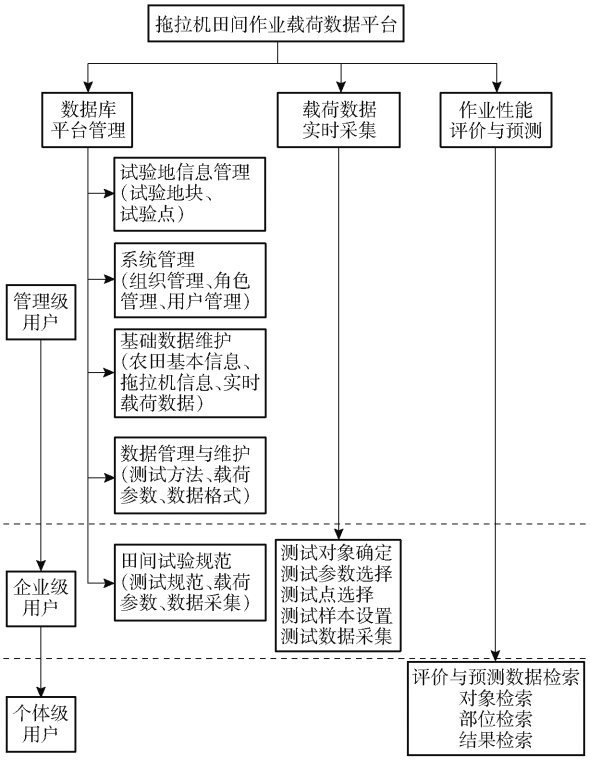


图 3 作业载荷数据平台总体结构与方案

Fig. 3 Overall structure and scheme of work load data platform

2.2 管理机制分析

系统管理机制包括用户权限管理、试验地信息管理、拖拉机信息管理、测试终端信息管理、作业信息管理以及平台信息管理等功能。用户权限管理包括对用户的基本信息、登录密码、访问权限级别进行管理。试验地信息管理包括对作业试验田的所属地区、基本环境的管理。拖拉机信息管理包括对拖拉机基本参数、配套作业机具的管理。测试终端信息管理包括对采集设备以及工作状态的管理。系统管理机制的有效运行可保证拖拉机作业载荷数据平台的正常运行。

2.3 网络结构分析

该数据平台作业载荷实时采集系统主要由全国范围内各主产区负责单位统筹管理，由主产区各试验测试站分别负责执行试验田以及测试样机的管理以及作业运行，考虑到我国农业主产区地域差别大、农业机械作业载荷复杂，有必要全面监控从试验地到测试终端的内在联系，以获得全国范围内拖拉机田间作业载荷的全面基础数据[12-15]。

作业载荷实时采集系统由各农业主产区管理单位、分布的各级试验站（省、市、县/区）和测试环节的基层测试站点构成。具体分层结构如图 4 所示。

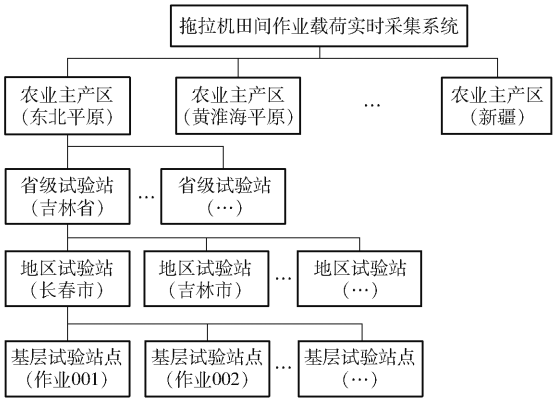


图 4 作业载荷实时采集系统分层结构

Fig. 4 Hierarchical structure of real-time load acquisition system

2.4 功能结构

基于用户群体需求导向，进一步完善拖拉机作业载荷数据库系统结构，明确数据库系统各模块部分的功能以及结构，如图 5 所示。平台系统管理包

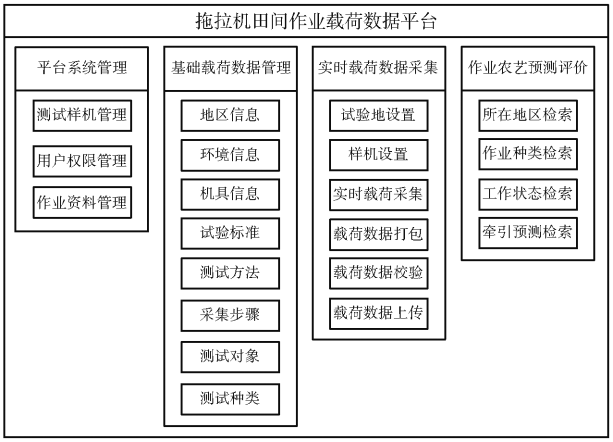


图 5 作业载荷数据库系统功能结构

Fig. 5 Functional structure of work load database system

括测试样机管理、用户权限管理以及作业资料管理。基础载荷数据管理包括地区信息、环境信息、机具信息、试验标准、测试方法、采集步骤、测试对象以及测试种类。实时载荷数据采集包括试验地设置、样机设置、实时载荷采集、载荷数据打包、载荷数据校验以及载荷数据上传。作业农艺预测评价包括所在地区检索、作业种类检索、工作状态检索以及牵引预测检索。

3　拖拉机作业载荷数据平台设计与构建

3.1　概念结构设计

基于数据平台多样性、包容性、全面性以及系统性特点需求，结合 E－R 概念设计的实体、属性和联系三要素，构建全国范围拖拉机作业载荷数据平台的概念模型。该数据库包括 4 个实体、若干属性以及各项必要的联系。各实体环环相扣，构建了数据平台的基本框架，各实体属性以及联系建立数据平台潜在逻辑，进一步丰富数据平台功能、提高可用性。E－R 结构框图如图 6 所示。

3.2　逻辑结构设计

根据作业载荷数据平台系统需求，剖析拖拉机田间作业载荷测试、采集、传输以及入网的全过程。基于作业载荷数据库 E－R 概念结构设计的数据字典，进行数据库逻辑架构设计，数据库系统主要由终

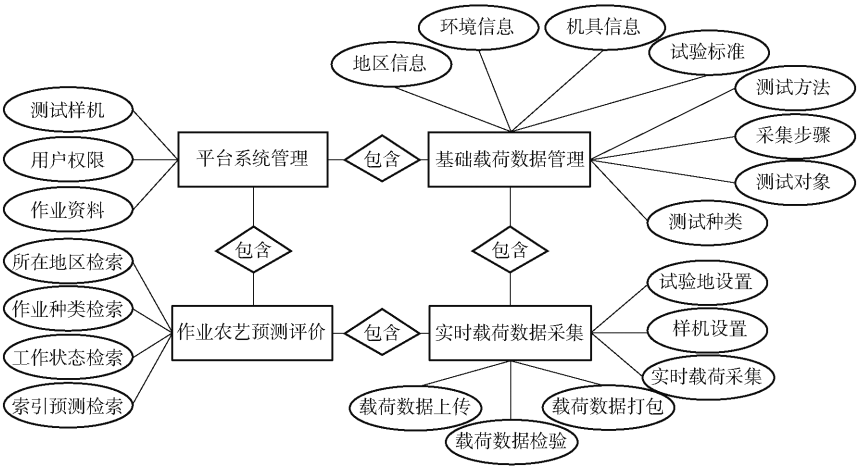


图 6　作业载荷数据库 E－R 概念结构框图

Fig. 6　Design of E－R conceptual structure of work load database

端表、农机表、传感器表、作业表、数据表等 11 个数据组成，其中主数据表与基础数据表相关联，以测试终端为主键，实时采集、传输、存储测试基础数据以及结果。形成的数据表关系如图 7 所示。

3.3　系统开发与构建

基于作业载荷数据库概念结构与逻辑结构，结合使用人员多样性、操作级别多层次、终端节点分布广以及作业环境复杂性等系统特点，进行数据平台基本框架设计以及服务器软件系统开发。

作业载荷数据库系统基于 Web2.0 架构，采用微服务技术结构体系开发，前端部分采用 HTML5/CSS3/JavaScript 等技术开发，数据库采用 MY SQL 5.7.27.0 版本，并且采用 RESTful API 架构作为方便前、后端通信的统一机制。

数据采集服务基于 C#. NET 技术开发，测试样机车载终端与平台服务器之间基于 TCP 传输方式，采用私有二进制协议即拖拉机机组作业载荷传输协议进行数据传输，关键数据采用 RSA 加密验证机制保护，可确保高吞吐量和高安全性。

关联数据库结构设计采用基础数据与不易变化数据结构化处理、易变化数据非结构化处理相结合的方式，可确保数据库的稳定性、灵活性以及兼容性；针对系统传感器多、数据量大以及采样频率范围广的特点采用分库分表方式处理数据，即按照需求业务不同将数据分库储存，按照时间维度不同将低频、高频数据分表储存。此外，通过数据库约束机制保证数据完整性，通过数据校验机制确保逻辑正确性，通过数据库备份确保数据高可用性。

基于以上内容，完成拖拉机作业载荷数据平台的设计与构建，田间试验以及试验数据等部分界面效果如图 8 所示。

4　基于遗传算法与神经网络的旋耕作业质量评价与预测

基于拖拉机作业载荷数据平台以及农业大数据融合技术，结合农机农艺要求，筛选部分实测数据研究拖拉机田间旋耕工况作业质量评价与预测的智能算法，并验证其可行性。

4.1　基于遗传算法的 BP 神经网络算法

针对 BP 神经网络预测模型连接权重随机赋值导致收敛速度过慢和结构模式不确定导致训练过拟合及学习能力不足的问题，本文提出基于遗传算法

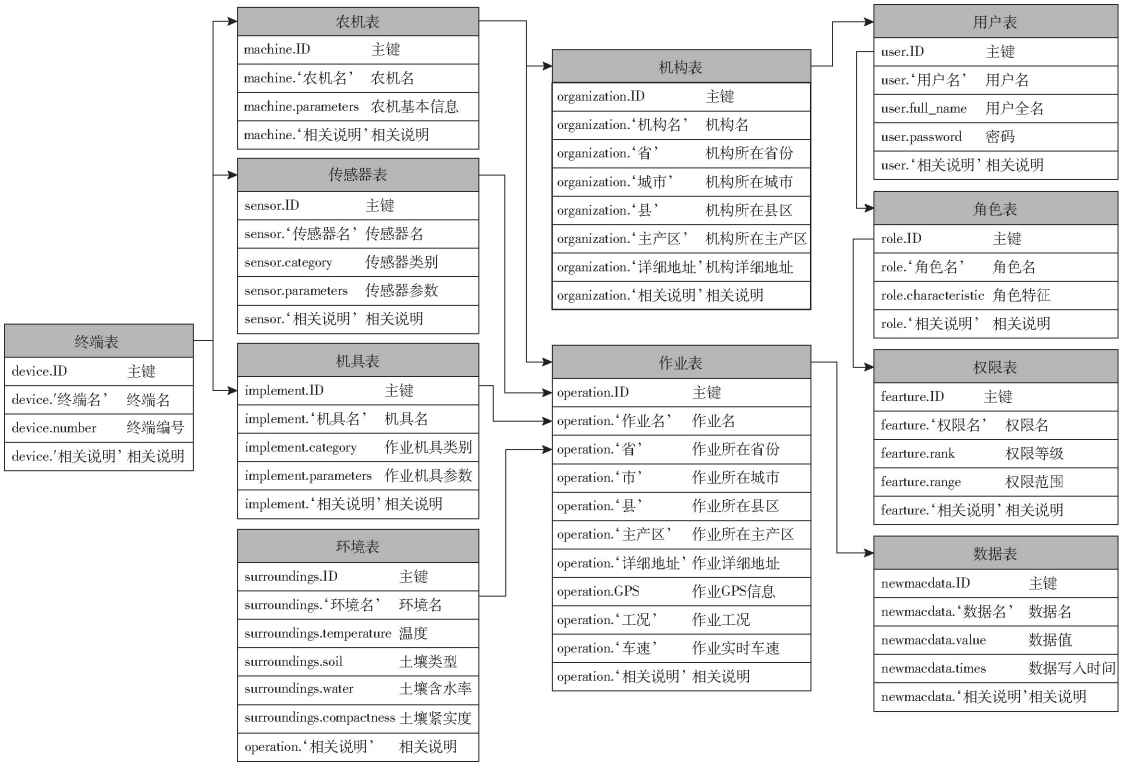
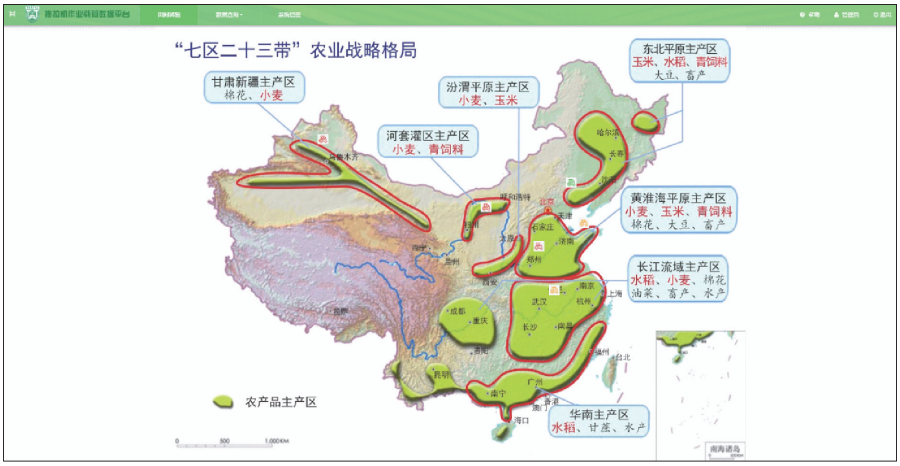


图 7 作业载荷数据库主要数据表关系

Fig. 7 Maindata table relations of job load database



(a) 田间试验界面



(b) 试验数据界面

图 8 拖拉机作业载荷数据平台界面

Fig. 8 Interfaces of tractor working load data platform

的 BP 神经网络算法，利用遗传算法全局搜索最优特性对 BP 神经网络进行优化，降低神经网络陷入局部最优解而无法稳定准确预测的风险，提升网络的收敛速度和系统预测精度，进一步提高 BP 神经网络的可行性[16-19]。遗传算法优化 BP 神经网络方法主要由 BP 神经网络结构确定、遗传算法优化 BP 神经网络权阈值权重矩阵、BP 神经网络预测3 部分组成[20-22]。其核心是采用遗传算法将神经网络函数计算的损失误差作为个体适应度，对权值、阈值进行选择、交叉和变异操作，使个体适应度尽可能地小，从而得到最佳的神经网络权值和阈值权重矩阵。基于遗传算法的 BP 神经网络算法流程如图 9 所示。

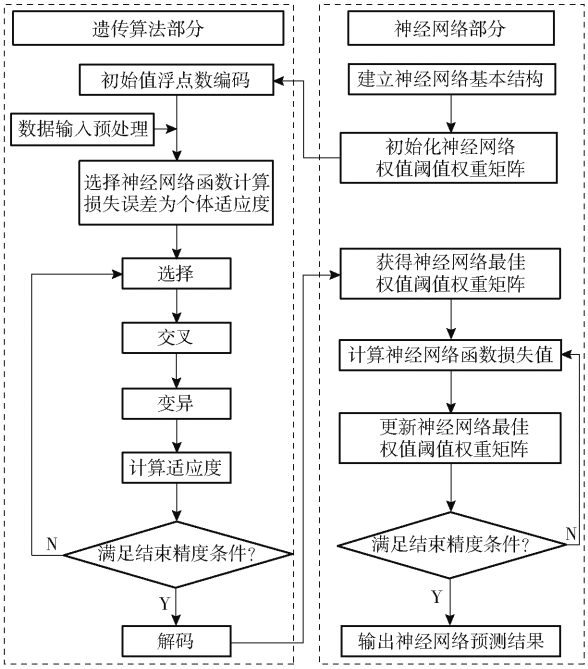


图 9　基于遗传算法的 BP 神经网络算法流程图

Fig. 9　Flow chart of BP neural network algorithm based on genetic algorithm

4.2　基于遗传算法的 BP 神经网络预测模型

4.2.1　BP 神经网络模型

BP 神经网络即误差反向传播神经网络，一般由输入层、隐含层和输出层构成，可以有效地解决各个输入指标之间的非线性关系，步骤如下：

（1）网络拓扑结构选择

拖拉机工作在土壤-机器-植物复杂系统，考虑其田间旋耕工况作业质量受到多因素耦合作用以及 3 层神经网络可以完成任意 n 维到 m 维的映射，本文选择 3 层 BP 神经网络结构。

（2）输入、输出层参数确定

为了建立简洁有效的 BP 神经网络模型，基于农机农艺要求，本文所采用的 BP 神经网络输入层参数为拖拉机电液悬挂左、右下拉杆销轴力，电液悬挂左、右下拉杆角度，动力输出轴扭矩以及行驶速度，输出层参数为优、中、差 3 种拖拉机田间旋耕工况作业质量水平。

本文神经网络模型的输入层参数存在量纲难以统一的问题，为减少拖拉机田间旋耕工况作业质量评价与预测的误判概率，对输入输出层参数进行归一化处理，即

$$\bar{p}_i = \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \tag{1}$$

式中　$\bar{p}_i$——归一化的特征值数据

p_i——第 i 个原始特征值数据

$p_{\max}$——原始特征值数据的最大值

$p_{\min}$——原始特征值数据的最小值

（3）隐含层节点数确定

隐含层节点数作为 BP 神经网络的重要组成部分，直接影响网络的非线性映射能力。隐含层节点数计算公式为

$$l = \sqrt{n+m} + a \quad (a \in [1,10]) \tag{2}$$

式中　n——输入层节点数

m——输出层节点数

计算可得该神经网络隐含层节点数范围为[3，13]，对比多次试验以及神经网络训练误差，当隐含层节点数为 10 时，神经网络预测性能最佳。

构建具有 1 个隐含层的 3 层 BP 神经网络结构，隐含层节点数为 10，具体 BP 神经网络预测模型结构如图 10 所示。

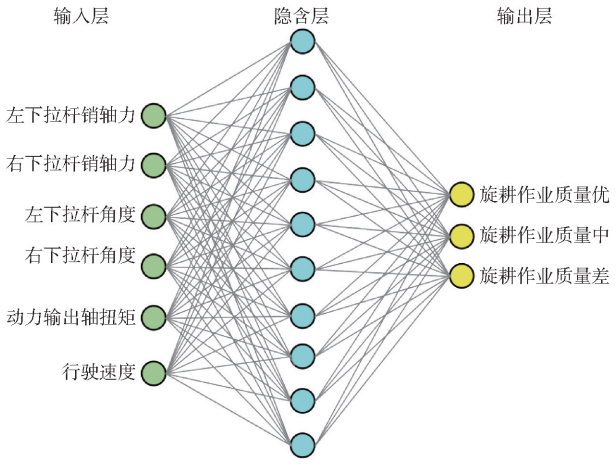


图 10　拖拉机旋耕作业性能预测的 BP 神经网络模型

Fig. 10　BP neural network model for performance prediction of tractor rotary tillage

（4）网络函数选择

考虑到预测模型非线性特征明显以及预测收敛快、误差小等要求，BP 神经网络的隐含层传递函数选择 sigmoid 函数，训练函数选择 trainlm 函数，学习函数选择 learngdm 函数，网络性能函数选择 mse 函数，仿真函数选择 sim 函数。

(5)权值阈值更新确定

权值阈值更新确定是 BP 神经网络采用的误差反向传播算法的核心部分,其主要工作是依次计算隐含层输出和输出层输出,进一步求得神经网络输出值与实际作业真实值之间的预测误差,最后根据公式实时更新神经网络隐含层与输出层的权值阈值。神经网络权值阈值更新确定过程包括隐含层输出、输出层输出、误差计算以及权阈值更新 4 个步骤,计算公式为

$$\begin{cases} f(x)=\dfrac{1}{1+\mathrm{e}^{x}} \\ H_j=f\left(\sum\limits_{i=1}^{n}w_{ij}x_i-a_j\right) & (j=1,2,\cdots,l) \\ O_k=\sum\limits_{i=1}^{n}H_jw_{ij}-b_k & (k=1,2,\cdots,m) \\ e_k=Y_k-O_k & (k=1,2,\cdots,m) \\ w_{ij}=w_{ij}+\eta H_j(1-H_j)x(i)\sum\limits_{k=1}^{m}w_{jk}e_k & (j=1,2,\cdots,l) \\ w_{jk}=w_{jk}+\eta H_je_k & (j=1,2,\cdots,l) \\ a_j=a_j+\eta H_j(1-H_j)\sum\limits_{k=1}^{m}w_{jk}e_k & (j=1,2,\cdots,l) \\ b_k=b_k+e_k \end{cases} \tag{3}$$

式中 $f(x)$——隐含层激励传递函数

x——输入变量

H_j——隐含层输出变量

w_{ij}——隐含层权值

a_j——隐含层阈值

O_k——输出层输出变量,即预测值

b_k——输出层阈值

i——输入层节点数

j——隐含层节点数

k——输出层节点数

Y_k——实际值

e_k——神经网络预测误差

η——神经网络学习速率

w_{jk}——输出层权值

4.2.2 预测网络模型的遗传算法优化

基于遗传算法的 BP 神经网络模思想是:通过遗传算法优化 BP 神经网络的初始权值阈值,对初始值进行编码和选择、交叉和变异等操作,获取最优参数并对神经网络进行赋值与训练,使优化后的神经网络能提高网络收敛速度以及预测准确性。基于遗传算法的 BP 神经网络模型实现过程主要包括种群初始化,适应度函数选择以及选择、交叉、变异操作[23-25]。

种群初始化主要采用浮点数编码方式,编码长度为神经网络所有权值个数($nm+lm$)和阈值个数($l+m$)之和,计算可得此种群初始化编码长度为 61。

适应度函数选择与计算是遗传算法的核心部分,将 BP 神经网络的预测输出值与真实作业值之间的误差平方和作为个体适应度,因此适应度函数为

$$F=\frac{1}{\dfrac{1}{n_0}\sum\limits_{i=1}^{m}(y_i-f(x_i))^2} \tag{4}$$

式中 n_0——训练样本总数

y_i——作业真实值

$f(x_i)$——神经网络预测值

选择操作采用最优个体最优保存和其余个体轮盘赌法选择的并存策略。交叉操作采用实数交叉法,变异操作采用实值变异法。其中因为涉及神经网络收敛速度,基于适应度需求选取交叉概率与变异概率遗传算子,计算公式为

$$p_c=\begin{cases} p_{ch}-\dfrac{(p_{ch}-p_{cl})(f'-f_{avg})}{f_{best}-f_{avg}} & (f'>f_{avg}) \\ p_{ch} & (f'\leqslant f_{avg}) \end{cases} \tag{5}$$

$$p_m=\begin{cases} p_{mh}-\dfrac{(p_{mh}-p_{ml})(f'-f_{avg})}{f_{best}-f_{avg}} & (f'>f_{avg}) \\ p_{mh} & (f'\leqslant f_{avg}) \end{cases} \tag{6}$$

式中 p_c——遗传算法交叉概率

p_{ch}——遗传算法交叉概率上限

p_{cl}——遗传算法交叉概率下限

p_m——遗传算法变异概率

p_{mh}——遗传算法变异概率上限

p_{ml}——遗传算法变异概率下限

f'——交叉染色体较大适应度

f_{avg}——染色体平均适应度

f_{best}——染色体最佳适应度

因此，本文构建了基于遗传算法的 BP 神经网络预测模型，计算并设置遗传算法参数：进化代数为 200，种群规模为 20，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.1。并选取均方根误差（RMSE）作为模型评价与预测性能的评价标准。

4.3　作业质量评价与预测分析

4.3.1　田间作业试验数据

作业载荷数据平台可实时获取多拖拉机、多工况、多地区的作业数据，但若考虑整个时间段、整个覆盖范围，数据总量会过大、不利于建模与分析。因此，基于 2019 年 3 月东北某区域某拖拉机某时间段内数据平台的田间作业数据，平均随机选取旋耕工况作业质量优、中、差 3 种情况，每种情况 3 000 组数据，总计 9 000 组数据作为训练集，其他任意一段时间总计 4 000 组旋耕工况作业数据作为测试集。根据训练集与测试集数据，对拖拉机旋耕工况作业质量性能进行评价与预测。

4.3.2　评价预测结果分析

应用遗传算法优化 BP 神经网络初始权值阈值，其中适应度函数变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知，当迭代次数不足 20 次时，即迭代前期平均适应度和最佳适应度均呈快速下降趋势，随着迭代次数的不断增加至 60 次时，迭代后期整体趋于平缓，其中虽然略有波动，但整体起伏不大。表明遗传算法迭代次数选择合理，遗传算法可以快速准确有效地优化神经网络权值阈值。

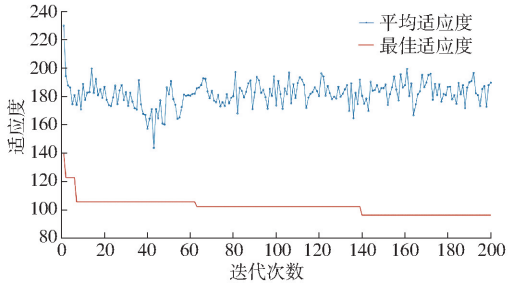


图 11　遗传算法适应度曲线

Fig. 11　Fitness curves of genetic algorithm

均方根误差（RMSE）是衡量神经网络性能的最常用参考标准，RMSE 越小，表示此神经网络预测性能越好。由图 12 可知，随着样本训练次数的不断增加，均方根误差由初始值 0.6 不断减少，在样本训练次数达到 10 次时，均方根误差已减至 0.01，表明基于遗传算法的 BP 神经网络预测模型能够准确快速拟合输入数据，预测结果接近真实情况。

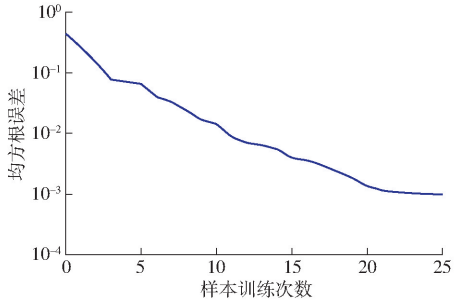


图 12　基于遗传算法的 BP 神经网络训练误差曲线

Fig. 12　BP neural network training error curve based on genetic algorithms

利用 9 000 组数据训练的基于遗传算法的 BP 神经网络模型在预测 4 000 组测试数据时，正确组数为 3 871，正确率为 96.77%。由此可见，基于遗传算法的 BP 神经网络模型预测结果与实际作业情况基本一致，错误率为 3.23%，可准确有效评价拖拉机田间旋耕工况作业质量。

5　结论

（1）基于我国“七区二十三带”农业战略格局，建立了全国范围的拖拉机测试终端布局，完成了测试终端硬件、测试工况以及测试系统功能架构。

（2）分析了拖拉机作业载荷数据库系统需求、管理机制、网络架构以及功能结构，设计并搭建了拖拉机作业载荷数据平台系统，可实时获取、存储拖拉机各关键零部件的田间作业载荷数据。

（3）研究了神经网络与遗传算法的融合算法，并基于拖拉机作业载荷数据平台对拖拉机田间旋耕作业质量进行实时预测与评价，预测精度达 96.77%，均方根误差（RMSE）小于 0.01，说明采用基于遗传算法的 BP 神经网络算法的拖拉机作业载荷数据平台预测评价拖拉机田间旋耕作业质量可行。

参　考　文　献

[1]　徐勇. 农业大数据平台的实现与数据分析算法[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2017.
XU Yong. Realization and data analysis algorithm of agricultural big data platform[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[2]　LAMRHARI S, ELGHAZI H, SADIKI T, et al. A profile-based big data architecture for agricultural context[C]//International Conference on Electrical and Information Technologies, 2016: 26 - 27.

[3]　WU B, ZHANG M, ZENG H, et al. Agricultural monitoring and early warning in the era of big data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1027 - 1037.

[4]　李洋. 紫菜苜蓿机械化生产数据平台及信息管理系统[D]. 北京：中国农业大学，2005.
LI Yang. Data platform and information management system of alfalfa mechanization production[D]. Beijing: China Agricultural

University, 2005. (in Chinese)
[5] 洪礼. 新型农业平台的研究与开发[D]. 杭州: 浙江理工大学,2015.
HONG Li. Research & development of the new-type agricultural platform[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015. (in Chinese)
[6] 冯阳. 大数据技术在农技推广中的应用研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
FENG Yang. Research on big-data technology application in agro-tech extension[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
[7] 郭雷风. 面向农业领域的大数据关键技术研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
GUO Leifeng. Study on the key technologies of big data for agriculture[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
[8] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):1 - 20.
LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for Internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):1 - 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180101&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)
[9] 于淼, 闫光, 刘克格. 基于 Ajax 的飞机载荷谱数据库媒体管理系统的构建[J]. 航空学报, 2008, 29(6):181 - 186.
YU Miao, YAN Guang, LIU Kege. Aircraft load spectrum database platform media management system constructed with Ajax technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6):181 - 186. (in Chinese)
[10] 孟庆瑞, 田兆锋, 张书明, 等. 混合模式下农业机械载荷谱数据管理系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 189 - 190.
MENG Qingrui, TIAN Zhaofeng, ZHANG Shuming, et al. Realization of load spectrum data management system for typical agricultural machinery based on hybrid model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 189 - 190. (in Chinese)
[11] 胡宇轩, 闫楚良. 数据挖掘技术在农业机械质量控制中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 153 - 156.
HU Yuxuan, YAN Chuliang. Design and implementation on data mining technology in quality control of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 153 - 156. (in Chinese)
[12] 田兆锋, 叶舸, 闫楚良. 基于存储策略的农业装备可靠性试验数据存取方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 202 - 206.
TIAN Zhaofeng, YE Ge, YAN Chuliang. Data accessing method based on storage strategy in reliability experiment of agricultural equipment [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 202 - 206. (in Chinese)
[13] 田兆锋, 闫楚良. 基于资源管理和 Silverlight 的农业装备信息网络平台[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11):151 - 155.
TIAN Zhaofeng, YAN Chuliang. Agricultural equipment information network based on resource management and Silverlight [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):151 - 155. (in Chinese)
[14] 闫楚良, 田兆锋. 农业机械与农副产品加工信息电子商务平台的建设[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1):152 - 154.
[15] 苑严伟, 冀福华, 赵博, 等. 基于 Solr 的农田数据索引方法与大数据平台构建[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11): 186 - 192.
YUAN Yanwei, JI Fuhua, ZHAO Bo, et al. Index method of farmland data based on Solr and construction of big data platform [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11):186 - 192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191121&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.021. (in Chinese)
[16] 王福忠, 任吉利, 刘薇. 基于遗传算法优化 BP 网络的箱式变电站故障预测策略[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019,38(5):93 - 98.
WANG Fuzhong, REN Jili, LIU Wei. Box-type substation fault prediction strategy based on GA - BP network[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2019, 38(5): 93 - 98. (in Chinese)
[17] 徐永春, 张森文. 改进遗传神经网络在甘蔗产量预测中的应用[J]. 华南农业大学学报, 2003,31(3):102 - 104.
XU Yongchun, ZHANG Senwen. The application on the sugar cane forecast with the neural networks using improved genetic algorithms[J]. Journal of South China Agricultural University, 2003, 31(3):102 - 104. (in Chinese)
[18] 李海青, 赵又群, 闫茜, 等. 基于遗传神经网络的车轮匹配整车逆动力学[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 27 - 32.
LI Haiqing, ZHAO Youqun, YAN Xi, et al. Inverse dynamics of vehicle matching with mechanical elastic wheels based on genetic neural network[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(5):27 - 32. (in Chinese)
[19] 陈英义, 程倩倩, 成艳君, 等. 基于 GA - BP 神经网络的池塘养殖水温短期预测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 172 - 178.
CHEN Yingyi, CHENG Qianqian, CHENG Yanjun, et al. Short-term prediction system of water temperature in pond aquaculture based on GA - BP neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170819&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.019. (in Chinese)
[20] 闫楚良, 郝云霄, 刘克格. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络的材料疲劳寿命预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014,44(6): 1710 - 1715.

YAN Chuliang, HAO Yunxiao, LIU Kege. Fatigue life prediction of materials based on BP neural networks optimized by genetic algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1710 - 1715. (in Chinese)

[21] 李修华, 李婉, 张木清, 等. 基于田间环境及气象数据的甘蔗产量预测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(增刊): 233 - 236.
LI Xiuhua, LI Wan, ZHANG Muqing, et al. Sugarcane yield prediction method based on field environmental and meteorological data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 233 - 236. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2019s036&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.036. (in Chinese)

[22] 刘雪, 李亚妹, 刘娇, 等. 基于 BP 神经网络的鲜鸡蛋货架期预测模型[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 328 - 334.
LIU Xue, LI Yamei, LIU Jiao, et al. BP neural network based prediction model for fresh egg's shelf life[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 328 - 334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20151044&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.044. (in Chinese)

[23] 李延梅. 一种改进的遗传算法及应用[D]. 广州:华南农业大学, 2012.
LI Yanmei. An improved genetic algorithm and its application[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[24] 孟庆宽, 张漫, 仇瑞承, 等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航线检测[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):39 - 46.
MENG Qingkuan, ZHANG Man, QIU Ruicheng, et al. Navigation line detection for farm machinery based on improved genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):39 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141007&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.007. (in Chinese)

[25] 程广伟, 周志立, 邓楚南, 等. 基于遗传算法的电涡流测功机预测控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):18 - 22.
CHENG Guangwei, ZHOU Zhili, DENG Chunan, et al. Predictive control of the eddy current dynamometer based on genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(7):18 - 22. (in Chinese)

(上接第 357 页)

[31] SUN T, QIN Y, XIE J, et al. Effect of Maillard reaction on rheological, physicochemical and functional properties of oat β-glucan [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 90 - 94.

[32] CHANG M C, TANAKA J. FT - IR study for hydroxyapatite/collagen nanocomposite cross-linked by glutaraldehyde [J]. Biomaterials, 2002, 23(24): 4811 - 4818.

[33] QU W, ZHANG X, HAN X, et al. Structure and functional characteristics of rapeseed protein isolate-dextran conjugates [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 329 - 337.

[34] QU W, ZHANG X, CHEN W, et al. Effects of ultrasonic and graft treatments on grafting degree, structure, functionality, and digestibility of rapeseed protein isolate-dextran conjugates [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 42: 250 - 259.

[35] XUE F, LI C, ZHU X, et al. Comparative studies on the physicochemical properties of soy protein isolate-maltodextrin and soy protein isolate-gum acacia conjugate prepared through Maillard reaction [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 490 - 495.

[36] ZHANG H, LI L, TATSUMI E, et al. Influence of high pressure on conformational changes of soybean glycinin [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2003, 4(3): 269 - 275.

[37] JIANG J, XIONG Y L, CHEN J. Role of β-conglycinin and glycinin subunits in the pH-shifting-induced structural and physicochemical changes of soy protein isolate [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2): C293 - C302.

[38] MU L, ZHAO M, YANG B, et al. Effect of ultrasonic treatment on the graft reaction between soy protein isolate and gum acacia and on the physicochemical properties of conjugates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 4494 - 4499.

[39] PIRESTANI S, NASIRPOUR A, KERAMAT J, et al. Preparation of chemically modified canola protein isolate with gum Arabic by means of Maillard reaction under wet-heating conditions [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 201 - 207.

[40] MARTÍNEZ K D, SANCHEZ C C, RUÍZ-HENESTROSA V P, et al. Effect of limited hydrolysis of soy protein on the interactions with polysaccharides at the air-water interface [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(5 - 6): 813 - 822.

[41] ZHANG B, GUO X, ZHU K, et al. Improvement of emulsifying properties of oat protein isolate-dextran conjugates by glycation [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 127: 168 - 175.

[42] CHIU T, CHEN M, CHANG H. Comparisons of emulsifying properties of Maillard reaction products conjugated by green, red seaweeds and various commercial proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2270 - 2277.