

电动转笼二次残差补偿雾化模型建立与试验

赵春江^{1,2} 柴舒帆^{1,3} 陈立平^{3,4} 张瑞瑞^{3,4} 李龙龙^{3,4} 唐青^{3,4}

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100; 2.北京农业信息技术研究中心,北京 100097; 3.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097; 4.国家农业航空应用技术国际联合研究中心,北京 100097)

摘要:为解决航空施药作业时雾滴粒径变量精细控制的难题,采用二次回归正交试验与机器学习相结合的方法建立了二次残差补偿雾滴粒径模型。在以 Aerial-E 型电动转笼雾化器为控制对象的雾化试验平台上进行了二次回归正交试验,分析了雾滴粒径与风速、施药流速、雾化器转速之间的相关性,建立了雾滴粒径模型;为了提高雾滴粒径模型预测精度,添加补偿因子建立了第 1 次优化雾滴粒径补偿模型;利用机器学习构建了第 2 次残差预测模型,将第 2 次残差预测模型与第 1 次优化雾滴粒径补偿模型线性叠加,得到了二次残差补偿雾滴粒径模型。为验证二次残差补偿雾滴粒径模型的有效性,进行了模型验证试验与对比试验,试验结果表明,二次残差补偿雾滴粒径模型预测偏差绝对值最大为 10.78%,其预测值与测量值的决定系数 R^2 为 0.95,比无补偿雾滴粒径模型提高了 0.06,比第 1 次优化雾滴粒径补偿模型提高了 0.05。将二次残差补偿雾滴粒径模型进行了等效变形,得到了电动转笼二次残差补偿雾化模型,基于该模型设计了电动转笼雾化系统,并进行了系统应用试验,结果表明,该系统雾滴粒径设定值与测量值的决定系数 R^2 为 0.94,雾滴相对分布跨度均小于 1.6,实现了在恒定风速、施药流速条件下雾滴粒径的控制。本研究结果可实现航空施药作业时雾滴粒径变量精细控制。

关键词: 航空施药; 电动转笼雾化器; 雾滴粒径模型; 残差补偿; 二次回归正交试验; 机器学习

中图分类号: S252.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)04-0019-09

OSID:



Establishment and Experiment of Quadratic Residual Compensation Atomization Model of Electricity Atomizer

ZHAO Chunjiang^{1,2} CHAI Shufan^{1,3} CHEN Liping^{3,4} ZHANG Ruirui^{3,4} LI Longlong^{3,4} TANG Qing^{3,4}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. National Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

4. National Center for International Research on Agricultural Aerial Application Technology, Beijing 100097, China)

Abstract: In order to solve the problem of precise control of droplet diameter variables during aviation spray, the quadratic regression orthogonal experiment and machine learning was used to establish the quadratic residual compensation droplet diameter model. With Aerial-E electricity atomizer as the control object, the quadratic regression orthogonal experiment was carried out on the atomization experiment platform to analyze the correlation between the droplet diameter and the wind speed, flow rate, atomizer speed, and droplet diameter model was established. In order to improve the prediction accuracy, a compensation factor was added to establish the first optimized droplet diameter compensation model. To further improve the prediction accuracy, the second residual prediction model was established by machine learning, the second residual prediction model and the first optimized droplet diameter compensation model were superimposed linearly to obtain the quadratic residual compensation droplet diameter model. In order to verify the validity of the quadratic residual compensation droplet diameter model, the model validation experiment and the comparative experiment were carried out, the results showed that the maximum deviation predicted by the quadratic residual compensation droplet diameter model was 10.78%, the R^2 between the predicted and measured values of the quadratic residual

收稿日期: 2019-12-05 修回日期: 2020-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701004)、北京市科技新星计划项目(Z18110006218029)、国家自然科学基金青年基金项目(31701315)和国家自然科学基金项目(31771674)

作者简介: 赵春江(1964—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事农业信息技术与精准农业技术研究,E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

compensation droplet diameter model was 0.95, which was 0.06 higher than that of the droplet diameter model and 0.05 higher than that of the first optimized droplet diameter compensation model. The quadratic residual compensation atomization model of electricity atomizer was obtained by equivalent deformation of the quadratic residual compensation droplet diameter model, and an electricity atomization system was designed based on the model. A system application experiment was carried out to verify the practicality of the system, the results showed that the R^2 between the expected and the measured value of the droplet diameter was 0.94, and the relative span of droplet was less than 1.6, which could realize the control of the droplet diameter under the condition of stable wind speed and flow rate. The results can realize precise control of droplet diameter variables during aviation spray.

Key words: aviation spray; electricity atomizer; droplet diameter model; residual compensation; quadratic regression orthogonal experiment; machine learning

0 引言

航空施药作业速度快、喷洒效率高、资源利用率高、节能,且应对灾害能力强,克服了传统施药机械或人工进地作业的难题,受到研究者的高度重视^[1-3]。但其离靶目标较远,在环境、温湿度和风场等因素的影响下,雾滴粒径大小会影响飘移情况,造成非靶标区域的人畜污染^[4-6]。因此,可控雾滴技术成为国内外航空喷雾技术的研究热点^[7]。

风洞试验具有模拟真实飞行环境、准确控制风向风速等参数、试验重复性好等优点^[8-10]。目前国内多采用风洞试验^[11-14]对航空施药技术进行研究。离心雾化技术通过改变离心雾化器的转速控制雾滴粒径,是当前公认的雾滴均匀度较好、雾滴粒径范围窄、可供“可控雾滴”之用的先进技术^[15]。刘德江等^[16]基于最佳粒径理论,以离心雾化技术为核心,设计了一款可精确控制雾滴粒径的3WKL-100型远程可控雾滴喷雾机;龚艳等^[17]以离心雾化技术为核心,通过研究离心雾化机理,研发了一款适用性强、可靠性好的遥控式风送变量可控雾滴喷雾机;茹煜等^[18]设计了一款无人直升机远程控制喷雾系统,并得到雾化盘直径为80 mm的离心雾化喷头的最佳作业参数。目前国内关于可控雾滴雾化系统的研究多适用于地面机械或无人机^[19-21],难以适应复杂作业环境。

鉴于目前针对农业航空施药中的大流量转笼雾化器雾化特性研究较少,且雾化系统环境适应性较差,本文建立一种基于二次残差补偿的雾滴粒径模型,在风洞实验室搭建试验平台,通过二次回归正交试验,建立风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径间的关系模型,在补偿因子修正关系模型的基础上,利用机器学习对模型残差进行建模,从而实现模型优化,以得到二次残差补偿雾滴粒径模型,通过对二次残差补偿雾滴粒径模型进行等效变形,得到电动转笼二次残差补偿雾化模型,并基于该模型设计一

套电动转笼雾化系统,实现在恒定风速、施药流速条件下的雾滴粒径可控,以期解决航空施药作业时雾滴粒径变量精细控制的问题。

1 试验平台构建与雾化系统设计

1.1 雾化试验平台原理与构成

为了建立雾滴粒径模型,在北京农业智能装备技术研究中心自建的IEA-I型航空施药高速风洞实验室搭建了一套可精确控制风速、施药流速与雾化器转速的雾化试验平台,如图1所示,包括操作台、药箱、水泵、风洞、流量计、压力计、电子调速器、雾化器、粒径测量仪、计算机和安装架,其中,药箱、水泵、流量计和压力计组成药液供给模块。试验时,风洞模拟航空施药作业时环境状态,药液供给模块为系统提供设定的施药流速,计算机通过串口控制电子调速器以调整雾化器转速,粒径测量仪测量雾化后的雾滴粒径,并通过计算机反馈测量值。

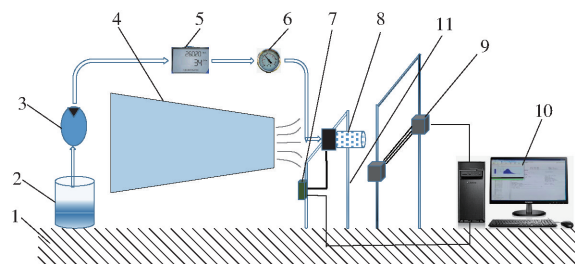


图1 雾化试验平台

Fig. 1 Atomization experiment platform

1. 操作台 2. 药箱 3. 水泵 4. 风洞 5. 流量计 6. 压力计
7. 电子调速器 8. 雾化器 9. 粒径测量仪 10. 计算机 11. 安装架

药液供给模块中,水泵选用谱罗顿750 W变频水泵(谱罗顿智控电子科技有限公司),进出口直径32 mm,额定扬程25 m,吸程8 m,最大流量 $2 \text{ m}^3/\text{h}$,调压范围 $0 \sim 0.4 \text{ MPa}$,精度 0.01 Pa ;流量计选用HSTL-N型涡轮流量计(北京华控兴业科技发展有限公司),其接口直径10 mm,精度 0.5% ,工作电压 24 V ,量程 $0.2 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$;压力计选用HSTL-802型

压力传感器(北京华控兴业科技发展有限公司),其工作电压 12 ~ 36 V,量程 0 ~ 1 MPa,精度 0.1 MPa;药箱选用白色塑料水箱。本试验以水作为试验介质,水泵将水从药箱吸出经压力计与流量计从雾化器喷出,压力计测量管道内水压,为调压水泵调整流速提供参考,流量计测量进入雾化器药液的流速。

风洞的风速范围 6.70 ~ 98.00 m/s,试验段直径 300 mm,动压稳定性系数小于 2%,试验段湍流度小于 1.0%,平均气流偏角小于 0.5%^[22],用于模拟航空施药过程环境因素。

电子调速器选用 Skywalker - 40A 型空模无刷马达电子调速器,其额定工作电压为 24 V,额定持续电流为 40 A,根据计算机发出的控制信号,调节雾化器的转速。

雾化器选用 Aerial - E 型电动转笼雾化器(北京农业智能装备技术研究中心),内置霍尔传感器可测量雾化器实际转速,其额定流量 10 L/min,极对数 13,额定工作电压 24 V,转速范围 700 ~ 8 000 r/min。

粒径测量仪选用马尔文激光粒度仪,其工作原理是利用激光的衍射原理,计算检测器上收集到的不同衍射图形的光强分布,得到雾滴粒径与相对分布跨度。通过选择不同镜头可覆盖 0.1 ~ 3 500.0 μm 的粒径范围,实现宽广的喷雾羽流粒度测试,相对分布跨度是衡量雾滴粒径分布的指标,其值越大,样品均一性越低,其计算公式为^[23-24]

$$\chi = \frac{D_{v0.9} - D_{v0.1}}{D_{v0.5}} \quad (1)$$

式中 $D_{v0.1}$ ——全部雾滴以直径从小到大顺序累积,体积累积量等于总体积的 10% 时,所对应的雾滴直径

$D_{v0.5}$ ——全部雾滴以直径从小到大顺序累积,体积累积量等于总体积的 50% 时,所对应的雾滴直径

$D_{v0.9}$ ——全部雾滴以直径从小到大顺序累积,体积累积量等于总体积的 90% 时,所对应的雾滴直径

本试验中,选 $D_{v0.5}$ 和 χ 为测量参照。

1.2 电动转笼雾化系统设计

所设计雾化系统原理如图 2 所示,主要由计算机、主控制器、风速传感器、流量传感器、按键输入模块、数据存储模块、显示模块、电子调速器、Aerial - E 型电动转笼雾化器和转速传感器组成。Aerial - E 型电动转笼雾化器原理图与实物图如图 3 所示,主要由分水芯、转笼、内套管、电机和安装架组成,安装架与飞机喷杆连接,药液进入分水芯,完成液流到液膜的转变实现一级雾化,电机带动内套杆与转笼转

动,液膜进入内套管,完成液膜到大液滴的转变实现二级雾化,大液滴进入转笼,完成大液滴到小雾滴的转变实现三级雾化。系统设定雾滴粒径后,传感器模块测量进入雾化器药液流速、风速与雾化器实际转速,主控制器首先设定残差为 0,即根据第 1 次优化雾滴粒径补偿输出模型计算雾化器参考转速,并通过串口将数据传到计算机,计算机利用建立的第 2 次残差预测模型计算残差量,同时将残差量通过串口传输到主控制器,主控制器再利用电动转笼二次残差补偿雾化模型计算最终雾化器转速,利用 PI 控制算法实现对雾化器转速调控,实现雾滴粒径可控,并通过数据存储模块与显示模块实现对雾化参数的存储与显示。利用试验标定 PI 控制器参数,标定结果如表 1,其中 k_p 为比例增益, k_i 为积分增益。

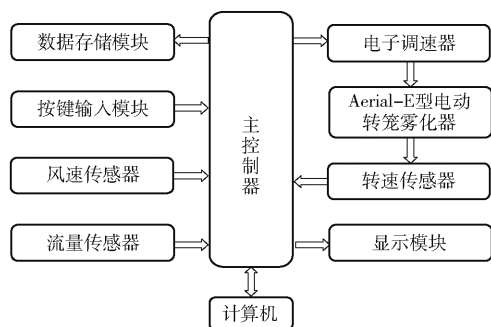


图2 雾化系统原理图

Fig. 2 Schematic of atomization system

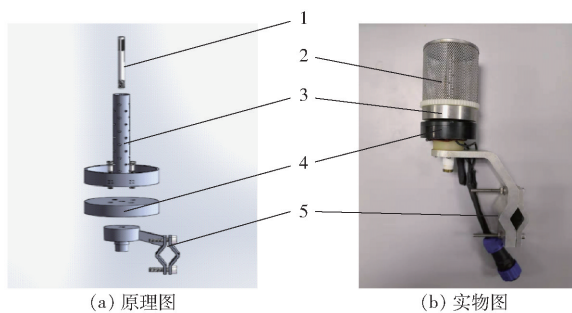


图3 Aerial - E 型电动转笼雾化器原理图与实物图

Fig. 3 Schematic and physical of Aerial - E electricity atomizer

1. 分水芯 2. 转笼 3. 内套管 4. 电机 5. 安装架

表1 PI 控制器参数

Tab. 1 PI controller parameter

雾化器转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	k_p	k_i
700 ~ 4 000	0.2	0.02
4 000 ~ 5 000	0.3	0.03
5 000 ~ 6 000	0.4	0.03

主控制器选用芯片 STM32F103 VET6, 主要完成风速、施药流速、雾化器实际转速与按键输入模块信息的采集,电机与显示器的驱动及控制算法的执行。

计算机选用戴尔 Optiplex 7010 Mini Tower, 其 CPU 是英特尔第三代酷睿 i5 - 3470 @ 3.2 GHz 四核, 内存 4 GB。

直升机施药作业速度范围 90 ~ 160 km/h, 风速传感器选用 HSTL - GDFS 型风速仪(北京华控兴业科技发展有限公司), 工作电压 24 V, 量程 0 ~ 70 m/s, 精度等级为 3% FS, 输出数据使用 RS485 协议串行输出。

Aerial - E 型电动转笼雾化器作业时, 施药流速常规作业范围 7.0 ~ 8.0 L/min, 流量传感器选用 YF - S201B 型涡轮流量计(中江节能电子有限公司), 其工作电压 5 ~ 18 V, 量程 1 ~ 30 L/min, 精度 2%, 通过实时采集流量传感器输出脉冲计算施药流速 q , 计算公式为

$$q = \frac{5f_1}{k} \quad (2)$$

式中 f_1 ——流量传感器脉冲频率

k ——流量传感器的仪表系数, 由北京华控兴业科技发展有限公司提供, 为 35

通过实时采集 Aerial - E 型电动转笼雾化器内置霍尔传感器输出脉冲数, 计算雾化器实际转速 n_1 , 计算公式为

$$n_1 = \frac{60f}{g} \quad (3)$$

式中 f ——速度传感器脉冲频率

g ——Aerial - E 型电动转笼雾化器转速比, 由北京农业智能装备技术研究中心提供, 为 13

数据存储模块选用 MicroSD 卡, 其存储内存 8 GB; 对施药过程中雾滴粒径设定值、施药流速、电动转笼雾化器转速及飞机飞行速度等数据进行存储。

显示模块选用 LCD1602(骏显电子科技有限公司), 其工作电压 3.3 V, 用于实时显示施药作业参数。

2 二次残差补偿雾化模型建立与优化

电动转笼二次残差补偿雾化模型技术框图如图 4 所示, 利用二次回归正交试验分析风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径间的相关关系, 建立雾滴粒径模型, 通过对雾滴粒径影响因素的分析, 添加补偿因子对模型第 1 次优化, 得到第 1 次优化雾滴粒径补偿模型, 利用机器学习对第 1 次优化雾滴粒径补偿模型残差进行分析, 得到第 2 次残差预测模型, 将其与第 1 次优化雾滴粒径补偿模型线性叠加得到二次残差补偿雾滴粒径模型, 同时对该模型进行等效变形, 得到电动转笼二次残差补偿雾化模型, 并搭

建基于该模型的电动转笼雾化系统。

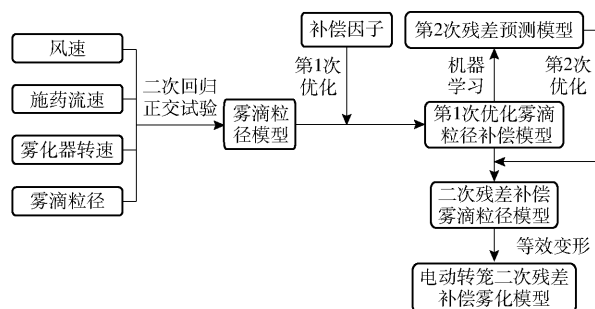


图 4 电动转笼二次残差补偿雾化模型技术框图

Fig. 4 Quadratic residual compensation atomization model of electricity atomizer

2.1 雾滴粒径模型

航空施药作业时, 离心式喷头喷雾系统雾化特性主要受雾化器转速、风速与施药流速的影响^[25-28]。为解决航空施药作业时雾滴粒径变量精细控制的问题, 本文进行二次回归正交试验^[29], 分析风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径间的相关关系, 建立雾滴粒径模型。试验中, 风速表示施药时雾化器周围的气流绝对速度, 直升机施药作业时飞行速度范围 90 ~ 160 km/h, 试验中风速范围设定为 25.46 ~ 77.08 m/s, 施药流速表示进入单个雾化器的药液流速, Aerial - E 型电动转笼雾化器作业时常规流速范围为 7.0 ~ 8.0 L/min, 试验中施药流速范围设定为 5.0 ~ 10.0 L/min, 雾化器转速范围设定为 2 000 ~ 6 000 r/min, 为进行失拟性检验, 设定零水平试验次数 $m_0 = 3$, 星号臂长度 $\gamma = 1.353$, 正交试验因素编码如表 2。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experiment factor codes

编码	因素		
	风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	施药流速 $q/(L \cdot min^{-1})$	雾化器转速 $n/(r \cdot min^{-1})$
1.353	77.08	10.0	6 000
1	70.35	9.3	5 478
0	51.27	7.5	4 000
-1	32.19	5.7	2 522
-1.353	25.46	5.0	2 000

二次回归正交试验设计方案与结果如表 3 所示, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别表示风速、施药流速与雾化器转速的编码值, 粒径均值 d' 为 3 次重复数据的平均值, 每次测量时间 50 s, 本试验中以粒径均值 d' 作为参照, 建立雾滴粒径模型。

所建立雾滴粒径模型的三元二次回归方程为

$$d = a + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 + b_{12} Z_1 Z_2 + b_{13} Z_1 Z_3 + b_{23} Z_2 Z_3 + b_{11} Z_1' + b_{22} Z_2' + b_{33} Z_3' \quad (4)$$

表3 二次回归正交试验设计方案与结果

Tab.3 Quadratic regression orthogonal experiment design and results

试验序号	Z_1	Z_2	Z_3	粒径均值 $d'/\mu\text{m}$
1	1	1	1	116.5
2	1	1	-1	156.6
3	1	-1	1	96.3
4	1	-1	-1	178.4
5	-1	1	1	236.9
6	-1	1	-1	428.1
7	-1	-1	1	309.2
8	-1	-1	-1	500.9
9	1.353	0	0	117.7
10	-1.353	0	0	557.2
11	0	1.353	0	220.5
12	0	-1.353	0	229.3
13	0	0	1.353	203.3
14	0	0	-1.353	279.8
15	0	0	0	226.7
16	0	0	0	216.3
17	0	0	0	213.7

其中 $Z'_j = \frac{Z_j^2}{0.686}$ ($j=1, 2, 3$) (5)

式中 d ——模型预测值

$a, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ 为回归系数, 得各回归系数依次为 254.896、-126.578、-5.041、-48.242、-5.996、38.304、-18.646、49.487、-11.978、-2.975, 计算方法见文献[29]。

对回归方程进行方差显著性分析, 得到回归方程各参数 $Z_1, Z_2, Z_3, Z_1Z_2, Z_1Z_3, Z_2Z_3, Z'_1, Z'_2, Z'_3$ 的 F 值为 98.853、0.149、13.633、0.144、5.896、1.397、8.246、0.483、0.028, 取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时, $F_{0.05}(1, 7) = 5.59$, 则本文视 $F > F_{0.05}(1, 7)$ 为高度显著水平, 包括 $F(Z_1), F(Z_3), F(Z_1Z_3)$ 与 $F(Z'_1)$; $F < F_{0.05}(1, 7)$ 则可以忽略, 包括 $F(Z_2), F(Z_1Z_2), F(Z_2Z_3), F(Z'_2)$ 与 $F(Z'_3)$, 则可将回归方程简化得到雾滴粒径模型

$$d = 254.896 - 126.578Z_1 - 48.242Z_3 + 38.304Z_1Z_3 + 49.487Z'_1 \quad (6)$$

2.2 二次残差补偿雾滴粒径模型优化

2.2.1 第1次优化雾滴粒径模型

在实际试验过程中, 由于雾滴粒径主要受风速、雾化器转速与施药流速的相互影响, 且 Aerial-E 电动转笼雾化器雾化后的雾滴粒径受施药流速的影响较大, 如图5。图中试验序号表示不同的试验条件, 序号1表示风速 $v = 70.35 \text{ m/s}$ 、雾化器转速 $n = 5478 \text{ r/min}$, 序号2表示风速 $v = 70.35 \text{ m/s}$ 、雾化器转速 $n = 2522 \text{ r/min}$, 序号3表示风速 $v = 32.19 \text{ m/s}$ 、雾化器转速 $n = 5478 \text{ r/min}$, 序号4表示风速 $v =$

32.19 m/s、雾化器转速 $n = 2522 \text{ r/min}$ 。由图5可知, 当风速与雾化器转速一定时, 随施药流速的增大, 雾滴粒径变大, 但雾滴粒径与施药流速间为非线性关系。由式(6)可知, 雾滴粒径受风速与雾化器转速的相互作用, 未考虑施药流速的影响, 因此本文添加补偿因子, 以得到第1次优化雾滴粒径补偿模型。

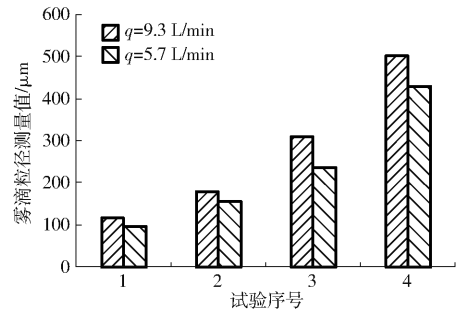


图5 雾滴粒径与施药流速关系

Fig.5 Relationship between droplet diameter and flow rate

在雾滴粒径模型显著性分析中, 忽略因素显著性从高到低依次为 $F(Z_2Z_3), F(Z'_2), F(Z_2), F(Z_1Z_2), F(Z'_1)$, 为考虑施药流速对雾滴粒径的影响, 本文取施药流速与雾化器转速的交互作用项 Z_2Z_3 作为补偿因子, 得第1次优化雾滴粒径补偿模型

$$d = 254.896 - 126.578Z_1 - 48.242Z_3 + 38.304Z_1Z_3 + 49.487Z'_1 - 18.646Z_2Z_3 \quad (7)$$

为验证第1次优化雾滴粒径补偿模型在各个变量范围内的拟合情况, 进行回归方程的失拟性检验, 将补偿因子列入回归方程的回归项, 得回归方程的 F 检测值 F_{lf} 为 36.058, 取显著性水平 $\alpha = 0.025$ 时, 得 $F_{0.025}(9, 2) = 39.390, F_{lf} < F_{0.025}(9, 2)$, 因此第1次优化雾滴粒径补偿模型合理, 失拟不显著。

对式(7)进行回归方程回代, 得到风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径间的第1次优化雾滴粒径补偿模型

$$d = 1117.26 - 0.13v^2 - 26.00v + 28.03q - 0.05n + 0.0014vn - 0.007qn \quad (8)$$

将第1次优化雾滴粒径补偿模型进行等效变形, 得到可根据雾滴粒径设定值、风速与施药流速计算雾化器转速的第1次优化雾滴粒径补偿输出模型

$$n = \frac{d + 0.13v^2 + 26.00v - 28.03q - 1117.26}{0.0014v - 0.007q - 0.05} \quad (9)$$

2.2.2 第2次优化雾滴粒径模型

试验发现第1次优化雾滴粒径补偿模型预测值与测量值的残差较大, 其残差与风速、施药流速、雾化器转速间存在非线性关系。鉴于机器学习中的集成模型可以组合多个弱监督模型的优点以得到更好

更全面的强监督模型,同时将提升树学习器(Boosting)与装袋学习器(Bagging)结合的集成模型可有效提高机器学习效果,减少方差,降低过拟合影响^[30-31]。本文采用以数据驱动的机器学习方法,利用提升树学习器与装袋学习器结合的集成模型对第1次优化雾滴粒径补偿模型残差的影响因素进行分析,构建第2次残差预测模型,并将第2次残差预测模型与第1次优化雾滴粒径补偿模型线性叠加得到二次残差补偿雾滴粒径模型。在图1所示雾化试验平台上进行第1次优化雾滴粒径补偿模型验证试验,得到400组不同试验条件下模型预测值与试验测量值间残差数据 $\{(v_1, q_1, n_1, \varepsilon_1), (v_2, q_2, n_2, \varepsilon_2), \dots, (v_m, q_m, n_m, \varepsilon_m)\}$, ε_m 为第 m 次验证试验残差,将数据的70%作为训练模型,30%作为验证模型,在Matlab的regression learner工具箱下进行数据拟合,选用 v, q, n 作为自变量, ε 作为响应量,利用可视化界面设定模型优化器为贝叶斯优化,迭代数为100,模型调优方法为5折交叉法,以使模型泛化能力最优,调优训练过程如图6所示。

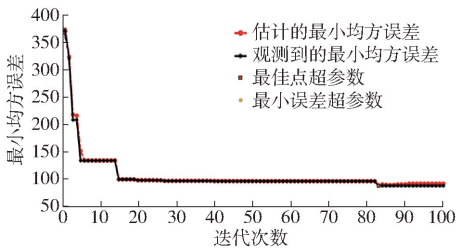


图6 调优训练曲线

Fig.6 Optimization training curves

由图6可知,最终最小均方误差趋于稳定,不再波动,模型预测值与实际值接近,其均方根误差为9.31,均方误差为86.78,平均绝对误差为5.83,将第2次残差预测模型与第1次优化雾滴粒径补偿模型线性叠加,得到二次残差补偿雾滴粒径模型

$$d = 1117.26 - 0.13v^2 - 26.00v + 28.03q - 0.05n + 0.0014vn - 0.007qn + \varepsilon' \quad (10)$$

式中 ε' ——第2次残差预测模型预测值

将二次残差补偿雾滴粒径模型进行等效变形,得到电动转笼二次残差补偿雾化模型

$$n = \frac{d + 0.13v^2 + 26.00v - 28.03q - 1117.26 - \varepsilon'}{0.0014v - 0.007q - 0.05} \quad (11)$$

该模型可根据雾滴粒径设定值、风速与施药流速计算得到最终雾化器转速,以实现雾滴粒径的变量精细控制。

本研究采用决定系数(R^2)、均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)4个指标对所建立模型进行评价。

3 模型性能试验验证

3.1 模型验证试验

为验证所建立二次残差补偿雾滴粒径模型的预测精度,在图1所示试验平台上进行模型验证试验,设定风速为25.46、33.80、42.62、51.27、51.54、60.68、70.35、77.08 m/s,设定施药流速为5.0、5.7、6.7、7.5、8.3、9.3、10.0 L/min,设定雾化器转速为2000、2500、3000、3500、4000、4500、5000、5500、6000 r/min,共进行41组试验,每组数据测量时间50 s。

试验结果如表4,其中,1~9组试验表明,二次

表4 模型验证试验结果

Tab.4 Results of model validation experiment

试验序号	风速 $v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	施药流速 $q/$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	雾化器 转速 $n/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	测量均值 $d'/\mu\text{m}$	模型预 测值 $d/$ μm	偏差/ %
1	33.80	5.0	3000	400.4	418.2	4.45
2	51.54	6.7	4000	225.6	214.1	-5.12
3	60.68	8.3	5000	166.9	166.9	0
4	70.35	10.0	4000	153.7	137.5	-10.50
5	51.54	5.0	3000	255.9	228.3	-10.78
6	70.35	8.3	5000	139.4	147.9	6.07
7	60.68	10.0	3000	201.2	197.6	-1.81
8	60.68	10.0	4000	188.9	171.0	-9.49
9	25.46	5.0	2000	559.5	586.4	4.81
10	51.54	7.5	2000	264.0	289.0	9.47
11	51.54	7.5	2500	259.9	258.4	-0.58
12	51.54	7.5	3000	246.0	245.9	-0.04
13	51.54	7.5	3500	241.0	230.7	-4.26
14	51.54	7.5	4000	221.5	214.1	-3.35
15	51.54	7.5	4500	207.1	202.8	-2.06
16	51.54	7.5	5000	189.2	169.3	-10.51
17	51.54	7.5	5500	180.6	171.5	-5.06
18	51.54	7.5	6000	172.8	168.7	-2.37
19	25.46	5.0	2000	559.5	586.4	4.81
20	33.80	5.0	2000	452.3	457.2	1.47
21	42.62	5.0	2000	332.7	340.2	1.08
22	51.54	5.0	2000	252.1	263.9	2.25
23	60.68	5.0	2000	222.6	185.2	4.69
24	70.35	5.0	2000	169.4	160.8	-5.08
25	77.08	5.0	2000	140.4	135.0	-3.85
26	25.46	7.5	4000	350.5	378.2	7.90
27	33.80	7.5	4000	330.2	361.2	9.49
28	42.62	7.5	4000	260.2	283.5	8.90
29	51.54	7.5	4000	214.4	214.1	-0.15
30	60.68	7.5	4000	174.5	161.0	-7.76
31	70.35	7.5	4000	144.4	127.5	-10.70
32	77.08	7.5	4000	134.5	119.3	-10.30
33	51.27	5.0	4000	217.0	220.5	1.61
34	51.27	7.5	4000	220.0	222.7	1.21
35	51.27	10.0	4000	239.2	226.7	-5.22
36	70.35	9.3	5500	139.6	144.0	3.12
37	70.35	5.7	5500	115.8	114.0	-1.52
38	33.80	9.3	5500	297.9	308.1	3.42
39	33.80	5.7	5500	243.8	260.3	6.75
40	33.80	9.3	2500	502.6	500.6	-0.41
41	33.80	5.7	2500	425.6	430.5	1.16

残差补偿雾滴粒径模型预测值与测量值间偏差绝对值最大为 10.78% ;10 ~ 18 组试验表明,风速与施药流速一定时,雾滴粒径随雾化器转速的升高而减小,雾滴粒径与雾化器转速呈负相关,模型预测值与测量值间偏差绝对值最大为 10.51% ;19 ~ 32 组试验表明,雾化器转速与施药流速一定时,雾滴粒径随风速的升高而降低,雾滴粒径与风速呈负相关,模型预测值与测量值间偏差绝对值最大为 10.70% ;33 ~ 41 组试验表明,风速与雾化器转速一定时,雾滴粒径与施药流速呈正相关,模型预测值与测量值间偏差绝对值最大为 6.75%。综上所述,二次残差补偿雾滴粒径模型预测偏差绝对值最大为 10.78%。

3.2 模型对比试验

为验证二次残差补偿雾滴粒径模型的优势,在图 1 所示试验平台上进行试验,得到 200 组风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径测量值的数据,将其作为对比试验数据集,对比 3 种模型的预测效果。

3.2.1 无补偿雾滴粒径模型

将数据集中的风速、施药流速与雾化器转速数据作为输入量,代入无补偿的雾滴粒径模型中得到雾滴粒径的模型预测值,模型预测值与试验测量值的拟合曲线如图 7 所示。

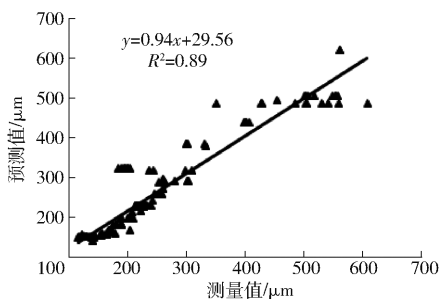


图 7 无补偿雾滴粒径模型拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of non-compensation droplet diameter model

由图 7 可知,无补偿雾滴粒径模型预测值与测量值的 R^2 为 0.89,其 MSE 为 $1\ 688.77\ \mu\text{m}^2$,RMSE 为 $41.09\ \mu\text{m}$,MAE 为 $25.14\ \mu\text{m}$ 。

3.2.2 第 1 次优化雾滴粒径补偿模型

将数据集中的风速、施药流速与雾化器转速数据作为输入量,代入第 1 次优化雾滴粒径补偿模型得到雾滴粒径的模型预测值,模型预测值与试验测量值的拟合曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,第 1 次优化雾滴粒径补偿模型预测值与测量值的 R^2 为 0.90,比无补偿雾滴粒径模型提高 0.01,其 MSE 为 $1\ 404.14\ \mu\text{m}^2$,RMSE 为 $37.41\ \mu\text{m}$,MAE 为 $24.33\ \mu\text{m}$,均小于无补偿雾滴粒径模型,表明第 1 次优化雾滴粒径补偿模型预测精度优于无补偿雾滴粒径模型。

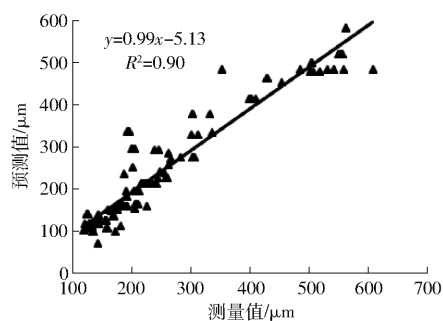


图 8 第 1 次优化雾滴粒径补偿模型拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of the first optimization droplet diameter compensation model

3.2.3 二次残差补偿雾滴粒径模型

将数据集中的风速、施药流速与雾化器转速数据作为输入量,代入二次残差补偿雾滴粒径模型中得到雾滴粒径的模型预测值,模型预测值与试验测量值的拟合曲线如图 9 所示。

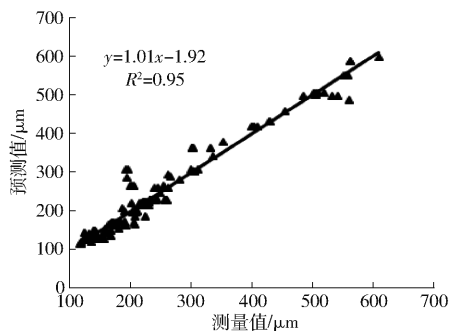


图 9 二次残差补偿雾滴粒径模型拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of quadratic residual compensation droplet diameter model

由图 9 可知,二次残差补偿雾滴粒径模型预测值与测量值的 R^2 为 0.95,比第 1 次优化雾滴粒径补偿模型提高 0.05,其 MSE 为 $582.84\ \mu\text{m}^2$,RMSE 为 $24.14\ \mu\text{m}$,MAE 为 $14.30\ \mu\text{m}$ 。

对比 3 种模型试验结果可知,二次残差补偿雾滴粒径模型的 R^2 最高,MSE、RMSE 与 MAE 均为最小,表明二次残差补偿雾滴粒径模型可行,该模型预测精度更高,对实现雾滴粒径可控具有更高的价值。

3.3 系统应用试验

利用所设计电动转笼雾化系统进行应用性试验,在图 1 所示雾化试验平台进行试验,设定风速为 33.80、51.54、60.68、69.00 m/s,设定施药流速为 5.0、6.7、8.3、10.0 L/min,设定雾滴粒径为 146、155、158、180、215、240、421 μm ,3 种设定条件随机组合,以检测电动转笼雾化系统雾化效果,即雾滴粒径与相对分布跨度,共得到 40 组雾滴粒径测量值数据。每组数据测量时间 50 s。

电动转笼雾化系统工作时,设定雾滴粒径后,系统测量风速与施药流速,并根据电动转笼二次残差

补偿雾化模型计算得到雾化器转速,以得到理想雾化效果,该系统中雾滴粒径设定值可等效为对应风速、施药流速与雾化器转速条件下的二次残差补偿雾滴粒径模型预测值,因此本研究将电动转笼雾化系统的雾化效果与模型的预测效果对比,以验证电动转笼雾化系统的雾化效果。

图10为电动转笼雾化系统雾滴粒径设定值与试验测量值的拟合曲线,该系统雾滴粒径设定值与测量值的 R^2 为0.94,其MSE为 $653.39 \mu\text{m}^2$,RMSE为 $25.56 \mu\text{m}$,MAE为 $20.34 \mu\text{m}$,表明电动转笼二次残差补偿雾化模型应用到电动转笼雾化系统时,准确度降低,但该系统的 R^2 、MSE、RMSE、MAE各项指标均优于无补偿雾滴粒径模型与第1次优化雾滴粒径补偿模型的预测效果,表明电动转笼二次残差补偿雾化模型应用到实践中时,虽然模型的准确度有所降低,但仍然具有一定的实用性。

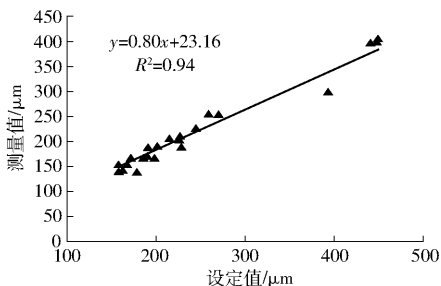


图10 电动转笼雾化系统雾滴粒径设定值与测量值拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve between expected and measured droplet diameter of electricity atomization system

电动转笼二次残差补偿雾化模型实际应用时,准确度降低。分析原因可知,由于所设计电动转笼雾化系统工作时,设定雾滴粒径后,系统首先设定残差为0,并测量风速与施药流速,计算雾化器转速,即根据第1次优化雾滴粒径补偿输出模型计算得到雾化器转速,然后将计算得到的雾化器转速与风速、施药流速作为输入量,代入第2次残差预测模型,得到残差,最后将残差、风速、施药流速与雾滴粒径设定值代入电动转笼二次残差补偿雾化模型,计算最终雾化器转速,在计算过程中,由于残差预测模型输

入量中的雾化器转速是根据第1次优化雾滴粒径补偿输出模型计算得到,在迭代运算过程中,造成输入偏差,导致该系统雾化效果有所降低。

相对分布跨度是衡量雾滴均匀性的指标,其值越大,表明雾化均匀性越差,其值越小,表明雾化均匀性越好;由图11可知,电动转笼雾化系统雾化后雾滴相对分布跨度均小于1.6,雾化均匀性较好。

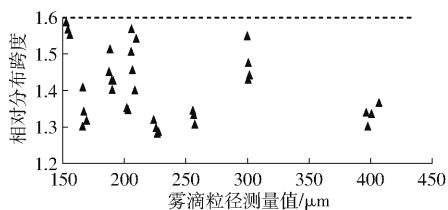


图11 雾滴相对分布跨度

Fig. 11 Relative span of droplet

综上所述,基于电动转笼二次残差补偿雾化模型的电动转笼雾化系统在恒定的风速、施药流速条件下,能自动测量风速与施药流速,实现雾滴粒径可控。

4 结论

(1)以Aerial-E型电动转笼雾化器为控制对象,进行了二次回归正交试验,分析了风速、施药流速、雾化器转速与雾滴粒径间的相关关系,建立了雾滴粒径模型,在补偿因子修正关系模型的基础上,利用机器学习对模型残差进行了建模,从而实现了模型优化,得到二次残差补偿雾滴粒径模型。试验结果表明,二次残差补偿雾滴粒径模型预测偏差绝对值最大为10.78%,其预测值与测量值的 R^2 为0.95,MSE、RMSE、MAE最小,分别为 $582.84 \mu\text{m}^2$ 、 $24.14 \mu\text{m}$ 、 $14.30 \mu\text{m}$,说明二次残差补偿雾滴粒径模型预测结果最优。

(2)搭建了基于电动转笼二次残差补偿雾化模型的电动转笼雾化系统,该系统可在恒定风速、施药流速环境下,实现雾滴粒径可控,且系统雾滴粒径设定值与测量值的 R^2 为0.94,雾滴相对分布跨度均小于1.6,可实现在风速、施药流速稳定情况下的雾滴粒径可控,雾化均匀性较好。

参 考 文 献

- [1] 周志艳,明锐,臧禹,等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 1-13.
ZHOU Zhiyan, MING Rui, ZANG Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 1-13. (in Chinese)
- [2] 张瑞瑞,文瑶,伊铜川,等. 航空施药雾滴沉积特性光谱分析检测系统研发与应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 80-87.
ZHANG Ruirui, WEN Yao, YI Tongchuan, et al. Development and application of aerial spray droplets deposition performance measurement system based on spectral analysis technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 80-87. (in Chinese)
- [3] XUE Xinyu, LAN Yubin, ZHU Sun, et al. Development an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system

- [J]. *Computer and Electronics in Agriculture*, 2016, 128(7): 58–66.
- [4] 唐青, 陈立平, 张瑞瑞, 等. IEA-I型航空植保高速风洞的设计与校测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(6): 73–81. TANG Qing, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Design and test of IEA-I high speed wind tunnel for aerial plant protection [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(6): 73–81. (in Chinese)
- [5] 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 77–86. LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 77–86. (in Chinese)
- [6] EBERT T A, TAYLOR R A, DOWNER R A, et al. Deposit structure and efficacy of pesticide application interactions between deposit size toxicant concentration and deposit number[J]. *Pesticide Science*, 1999, 55(8): 783–792.
- [7] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 53–59. ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 53–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
- [8] NUYTENS D, TAYLOR W A, SCHAMPHELEIRE M D, et al. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(3): 271–280.
- [9] TESKE M E, THISTLE H W, HEWITT A J, et al. Rotary atomizer drop size distribution database[J]. *Transactions of the ASABE*, 2005, 48(3): 917–921.
- [10] 李继宇, 郭爽, 姚伟祥, 等. 气流作业下雾滴粒径稻株间分布特性与风洞模拟试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 148–156. LI Jiyu, GUO Shuang, YAO Weixiang, et al. Distribution characteristics of droplet size in rice field and wind tunnel simulation test under airflow operation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 148–156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190817&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.017. (in Chinese)
- [11] 唐青, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 高速气流条件下标准扇形喷头和空气诱导喷头雾化特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 121–128. TANG Qing, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Atomization characteristics of normal flat fan nozzle and air induction nozzle under high speed air flow conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(22): 121–128. (in Chinese)
- [12] KIRK I W. Measurement and prediction of atomization parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles[J]. *Transaction of the ASABE*, 2007, 50(3): 693–703.
- [13] MARTIN D E, CARLTON J B. Airspeed and orifice size affect spray droplet spectrum from an aerial electrostatic nozzle for fixed-wing applications[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(1): 5–10.
- [14] LI Jiyu, SHI Yeyin, LAN Yubin, et al. Vertical distribution and vortex structure of rotor wind field under the influence of rice canopy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 159: 140–146.
- [15] OZKAN H E, REICHARD D L, SWEENEY J S. Droplet size distributions across the fan patterns of new and worn nozzles [J]. *Transactions of the ASABE*, 1992, 35(4): 1097–1102.
- [16] 刘德江, 龚艳, 张骁, 等. 3WKL-100型远程可控雾滴喷雾机的设计与试验[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(22): 252–256.
- [17] 龚艳, 陈小兵, 赵刚, 等. 设施农业可控雾滴喷雾机的设计与试验[J]. *农业开发与装备*, 2012, 18(5): 10–13.
- [18] 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 47–52. RU Yu, JIA Zhicheng, FAN Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 47–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120609&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.009. (in Chinese)
- [19] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(12): 94–96. ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 94–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121217&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.017. (in Chinese)
- [20] 陈建泽, 宋淑然, 孙道宗, 等. 远射程风送式喷雾机气流场分布及喷雾特性试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 72–79. CHEN Jianze, SONG Shuran, SUN Daozong, et al. Test on airflow field and spray characteristics for long-range air-blast sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(24): 72–79. (in Chinese)
- [21] TANG Qing, ZHANG Ruirui, DING Chenchen, et al. Application of ultrasonic anemometer array to field measurements of the downwash flow of an agricultural unmanned helicopter[J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62(5): 1219–1230.
- [22] 张瑞瑞, 李龙龙, 付旺, 等. 脉宽调制变量控制喷头雾化性能及风洞环境雾滴沉积特性[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 42–51. ZHANG Ruirui, LI Longlong, FU Wang, et al. Spraying atomization performance by pulse width modulated variable and droplet deposition characteristics in wind tunnel[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 42–51. (in Chinese)

- www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s14&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.014. (in Chinese)
- [23] 苑进,刘雪美,张晓辉,等.考虑自然风的气辅式喷雾雾滴飘失特性建模与补偿[J].农业工程学报,2013,29(14):45-52.
YUAN Jin, LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, et al. Modeling and compensation for characteristic of droplet drift on air-assisted boom spraying accounting for wind speeds[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(14):45-52. (in Chinese)
- [24] 杨洲,牛萌萌,李君,等.不同侧风和静电电压对静电喷雾飘移的影响[J].农业工程学报,2015,31(24):39-45.
YANG Zhou, NIU Mengmeng, LI Jun, et al. Influence of lateral wind and electrostatic voltage on spray drift of electrostatic sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(24):39-45. (in Chinese)
- [25] 张慧春,DORR G,郑加强,等.喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J].农业工程学报,2015,31(3):94-100.
ZHANG Huichun, DORR G, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment and regression model for spray drift[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(3):94-100. (in Chinese)
- [26] 张慧春,郑加强,周宏平,等.农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):118-122.
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition distribution and off-target drift during pesticide spraying operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(8):118-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170812&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.012. (in Chinese)
- [27] 李超,张晓辉,姜建辉,等.葡萄园立管风送式喷雾机的研制与试验[J].农业工程学报,2013,29(4):71-78.
LI Chao, ZHANG Xiaohui, JIANG Jianhui, et al. Development and experiment of riser air-blowing sprayer in vineyard[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4):71-78. (in Chinese)
- [28] CLAUSET A, SHALIZI C R, NEWMAN M E J. Power-law distributions in empirical data[J]. SIAM Review, 2009,51:661-703.
- [29] 陈琳,刘维奇.重尾分布族及其关系图[J].高校应用数学学报A辑,2009,24(2):166-174.
- [30] 王志强.基于局部中心量度的聚类算法研究[D].广州:华南理工大学,2018.

(上接第27页)

- [23] 杨风波,薛新宇,蔡晨,等.航空专用离心喷头雾化性能试验与影响因子研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):96-104.
YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Atomization performance test and influence factors of aviation special centrifugal nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):96-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190911&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.011. (in Chinese)
- [24] 翟长远,王秀,密雅荣,等.PWM变量喷雾喷头流量模型[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):40-44.
ZHAI Changyuan, WANG Xiu, MI Yarong, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):40-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120409&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.009. (in Chinese)
- [25] 兰玉彬,彭瑾,金济.农药喷雾粒径的研究现状与发展[J].华南农业大学学报,2016,37(6):1-9.
LAN Yubin, PENG Jin, JIN Ji. Research status and development of pesticide spraying droplet size[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(6):1-9. (in Chinese)
- [26] CZACZYK Z. Influence of air flow dynamics on droplet size in conditions of air-assisted sprayers[J]. Atomization and Sprays, 2012, 22(4):275-282.
- [27] 茹煜,金兰,周宏平,等.航空施药旋转液力雾化喷头性能试验[J].农业工程学报,2014,30(3):50-55.
RU Yu, JIN Lan, ZHOU Hongping, et al. Performance experiment of rotary hydraulic atomizing nozzle for aerial spraying application[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3):50-55. (in Chinese)
- [28] 张慧春,郑加强,周宏平,等.转笼式生物农药雾化喷头的性能试验[J].农业工程学报,2013,29(4):63-70,295.
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Performance experiments of rotary cage atomizer for biological pesticide application[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4):63-70,295. (in Chinese)
- [29] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].3版.北京:化学工业出版社,2017.
- [30] ROSSEVINE A N, OSCAR K, MEWATI A. Integrating program and algorithm visualisation for learning data structure implementation[J]. Egyptian Informatics Journal, 2019, 20(3):193-204.
- [31] QIU Weiwei, XIONG Zhihua, ZHANG Jie, et al. Integrated predictive iterative learning control based on updating reference trajectory for point-to-point tracking[J]. Journal of Process Control, 2020, 85:41-51.