

果园风送喷雾机气助式喷头风力性能数值模拟与试验

杨风波 张 玲 薛新宇 金永奎 陈 晨 孙 涛

(农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对直筒型气助式喷头风力性能较弱的问题,结合单点风速测试和数值模拟,研究了一种“尾部先收缩后扩张”气助式喷头的尾部参数对风力性能的影响规律。首先,采用雷诺平均 $N-S$ (Navier-Stokes) 方程及 RNG (Renormalization group) $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立了该型喷头的流场计算模型,基于风速测试验证了该模型的有效性与可靠性;其次,通过数值计算对比了两种喷头的风力性能,结果表明,在进口参数总压 105 600 Pa、静压 105 200 Pa 时,本文所提喷头出口平均风速是直筒型喷头对应值的 1.36 倍。为了研究尾部参数(收敛段内缩长度、扩张段高度)对本文所提喷头风力性能的影响,以数值计算、Opt LHD (Optimal latin hypercube design) 试验设计、径向基函数神经网络 (Radial basis function neural network, RBFNN) 为理论基础,构建了风力性能参数的代理模型,出口端流量、平均风速的代理模型 R^2 分别为 0.983 54、0.987 28,表明该模型可用于喷头风力性能预测,指导参数科学配置。基于代理模型,对喷头风力性能参数的影响因子进行了分析及单目标优化,随着扩张段高度、收敛段内缩长度的增大,出口端平均风速均呈现下降趋势,而流量均呈现先上升后下降的变化趋势;当扩张段高度、收敛段内缩长度取值为 1.08、5.39 mm 时,出风量达到最大值 0.017 9 kg/s;而两值分别取 0、0 mm 时,末端平均风速达到最大值 67.9 m/s。针对末端流量、平均风速相互矛盾的问题,进行了多目标优化,得到了喷射性能参数最优 Pareto 解集,为气助式喷头与果园间的优化匹配设计提供了参考。

关键词: 果园风送喷雾机; 气助式喷头; 风力性能; 数值模拟; 试验

中图分类号: S491; V211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)06-0038-10

Numerical Simulation and Test of Wind Performance of Gas Spray Nozzle for Orchard Air-assisted Sprayer

YANG Fengbo ZHANG Ling XUE Xinyu JIN Yongkui CHEN Chen SUN Tao

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: Aiming at the problem of weak wind power performance of straight gas-assisted nozzle, the effects of nozzle tail parameters on the flow wind power performance of new “tail first contraction and then expansion” pneumatic nozzle were studied with the combination of single point wind speed test and numerical simulation. The three dimensional numerical model was established for the pneumatic nozzle based on the Reynolds averaged $N-S$ equation and realizable turbulence model, and the correctness and validity of computational fluid dynamics (CFD) model were also verified by the wind speed test. Secondly, the wind performance of two types of nozzles was compared by numerical calculation. The results showed that outlet average wind speed was 1.36 times of the straight nozzle when the total inlet pressure was 105 600 Pa and the static pressure was 105 200 Pa. In order to study the effect of the tail parameters (the retract length of the convergent section and the height of the expansion section) on the wind performance of new type nozzle, the agent mathematical models were established by the optimal Latin hypercube design and radial basis function neural network (RBFNN), thus greatly facilitating the automatic modeling and compensating for the large amount of calculation for CFD. The R^2 -variance of outlet flow and outlet average wind speed were 0.983 54 and 0.987 28, respectively, the agent mathematical model could be used for performance prediction and guiding the scientific configuration of

收稿日期: 2017-12-18 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项基金项目(Y2016CG28)和国家自然科学基金项目(51705264)

作者简介: 杨风波(1987—),男,助理研究员,博士,主要从事精准施药技术研究,E-mail: yangfengbo.cool@163.com

通信作者: 张玲(1965—),女,研究员,主要从事植保机械研究,E-mail: 1173348176@qq.com

structure parameters. The intelligent decision and optimization research of the influence factors were researched based on agent mathematical model. With the increase of the height of expansion and increase of retract length, the average wind speed at the outlet end showed a downward trend, while the flow rate showed a trend of first increase and then decrease. The air flow reached the maximum value of 0.017 9 kg/s when the height of the expansion section was 1.08 mm and the retract length of contraction in convergent section was 5.39 mm; the average wind speed reached the maximum value of 67.9 m/s when the height of the expansion section was 0 mm and the retract length of contraction in convergent section was 0 mm. Multi-objective optimization was made, the optimal Pareto set solution of the wind performance parameters were obtained, which provided a diversified reference for optimization match design of pneumatic nozzle and orchard.

Key words: orchard air-assisted sprayer; pneumatic nozzle; wind power performance; numerical simulation; experiment

0 引言

果园风送喷雾作业过程中,药液雾滴是在喷雾机输出辅助气流的携带下被运输到果树冠层,喷雾机依靠末端喷头的强大气流将雾滴吹送到植株冠层的各个部位,气流有助于提高果园喷雾机的射程、助力雾滴穿透稠密的冠层并促使叶片翻动,提高叶片附着率。基于此,国内外学者对果园喷雾机输出辅助气流场速度、药液雾滴沉积分布及影响因子进行了相关研究^[1]。学者们一方面通过改进结构设计来提高装备的对靶性、沉积率;另一方面通过提升风机输出部件的风力性能,改善穿透性、沉积率^[2-6]。

在结构设计方面,周良富等^[7]对一种新型组合圆盘式喷雾机不同转速下的喷雾沉积规律进行了试验研究,得到各喷头喷雾量差异较小时的最佳转速为 1 400 r/min。宋淑然等^[8-9]针对一种宽喷幅风送式喷雾机,结合风场测试及数值优化方法对风送喷雾机喷筒及导流器进行了优化,给出了优化后的结构。李龙龙等^[10]研发了新型果园仿型喷雾机,开展了和常规风送喷雾机喷雾性能的对比试验,新仿型果园喷雾机大大提高了对靶性,节省药液 42.70%。

在喷雾机输出辅助气流和药液雾滴的匹配方面,采用单一试验方法研究自然风、空气温度、相对湿度等因素对施药过程的影响很困难,而采用 CFD (Computational fluid dynamics) 技术进行研究,可利用 CFD 边界自由设置的特点,实现各参数按照要求改变,进而克服试验不可控因素对试验结果的影响。DELELE 等^[11-13]通过 CFD 计算建立了不同类型果园风送喷雾机风场模型,以评价喷雾机作业性能;ENDALEW 等^[14-15]基于 CFD 计算,对 3 种组合风机产生的气流场进行了试验及 CFD 计算分析,详细对比了 3 种机具输出气流场对冠层风速的影响规律。文献^[16-18]指出风机风量决定了风速,并通过大量试验得出雾滴在冠层的穿透性、沉积量与出口风速正相关。傅泽田等^[19]利用 CFD 数值模拟对

Hardi LB-255 型风送喷雾机风扇出口外流场气流速度分布衰减规律进行了分析,并通过试验验证模型的准确性。

上述研究结果均显示建立的 CFD 模型能够直观反映气流场特性,是试验研究的有效补充;而风送喷雾机的输出风力性能是影响喷雾作业的关键。气助式喷头是风送喷雾机中完成离心风机动力转换、产生风力场、提高穿透性的关键部件,目前关于气助式喷头的结构对输出风力性能的影响研究较少。

鉴于此,本文针对一种出口末端先收敛、后扩张的气助式喷头,结合风场测试试验及 CFD 计算分析该型气助式喷头的风力性能,通过详细的数值计算分析内部流场演化规律;结合试验设计和 RBFNN 建立该型喷头出口平均风速、流量的代理模型;以收敛段内缩长度和扩张段高度为设计变量,对出口平均风速、流量的风力性能参数进行决策研究及优化,提高气助式喷头的风力性能,以期为后期果园风送喷雾机整机的穿透性及沉积率研究提供前期技术支撑。

1 数值计算方法

对于气助式喷头中空气连续介质的紊流,采用基于欧拉描述的三维 Navier-Stokes 方程来描述。在控制体内选取任一标量 ϕ ,则此标量应该满足守恒条件^[20]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中 ρ ——气体密度,kg/m³
 t ——气体流动时间,s
 $\mathbf{v}$ ——速度矢量,m/s
 Γ ——扩散系数 S_ϕ ——源项

当 ϕ 取 1 时,质量守恒方程可以表述为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{v}) = S_m \quad (2)$$

式中 S_m ——控制体 Ω 内源项质量生成率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
当 ϕ 取速度矢量 $\mathbf{v}$ 在坐标轴上 x_i 方向的速度分量 u_i 时, 可得动量守恒方程式为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \text{div}(\mu \text{grad} u_i) + S_{Mi}$$

(3)

式中 p ——气体压力, Pa
 μ ——流体的动力粘性系数
 S_{Mi} —— x_i 方向单位体积内动量源项, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$
当 ϕ 取比总焓 h_0 时, 可得能量守恒方程式为

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_0 \mathbf{v}) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \text{div}(k_c \text{grad} T) + \psi + S_H$$

(4)

式中 k_c ——气体热传导系数
 ψ ——单位体积内流体粘性力做功功率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$
 T ——气体温度, K
 S_H ——单位体积内能量源项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$

气助式喷头内部有低速流动区域, 末端有高速流动区域, 鉴于此, 湍流模型采用既适用于高雷诺数, 也适用于低雷诺数的 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[21-22]。使用有限体积法, 对三维 Navier-Stokes 方程进行离散化^[23], 为保证计算的稳定性和收敛性, 采用耦合格式进行数值迭代^[24]。

2 气助式喷头气流场特性分析

2.1 流场数值计算试验验证

果园风送喷雾机功能部分如图 1 所示。本文研究对象如图 2a 所示气助式喷头(和图 1 中的第 4 个主要部件一致), 为显示内部结构, 图 2b 中给出了喷头壁面的网格示意图, 下方圆柱为药液入口管道, 上方长方块为加强筋板, 右端为气流入口, 左端为气流出口。如图 2 所示, 尾部并非直筒型, 有一个先收敛后扩张的设计。作为喷头的入口条件, 在管道的尾端安装喷头, 并测量喷头尾部气流的风速, 为数值计算试验验证打基础。

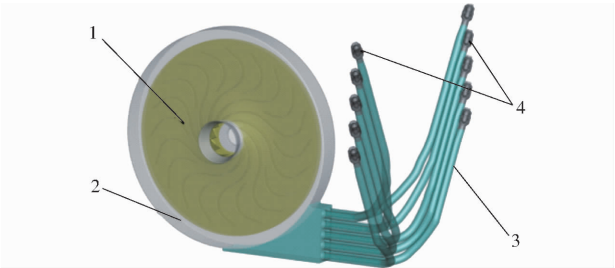


图 1 果园风送喷雾机功能部分结构图
Fig. 1 Functional structure of orchard wind spray sprayer
1. 风机内部转子 2. 风机内部定子 3. 风机管道 4. 气助式喷头

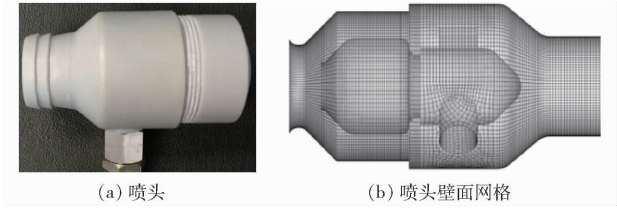


图 2 喷头及网格示意图
Fig. 2 Nozzle and mesh sketches

喷头的风速测试方案如图 3a 所示, 图中小型离心风机提供风量输入; 鉴于风机内部结构并不清晰, 在管道中开孔(测试时孔无漏风现象)测量流动空气参数, 图 3b 为喷头入口风速条件的测试方案, 打开风机并稳定在一个固定挡位, 将 KIMO 型便携式风速仪固定在一个恒定的轴向位置, 均布测量此轴向位置各径向点风速, 作平均之后的风速为 15 m/s 。图 3c 为喷头入口压力条件的测试方案, 风机挡位和图 3b 一致, 采用图 3c 中的 U 型管测量喷头入口处压力, U 型管中盛有 $1/2$ 体积的液态水, 测试过程稳定后, 高端水位 612.50 mm , 低端水位 472.00 mm , 换算为管道气流压力 1377 Pa 。

采用图 3d 中的方案测试距喷头尾端不同轴向距离的风速, 在喷头下方长钢板尺确定的轴向位置, 测试探头沿着径向导轨逐步移动, 测试该轴向位置的最大风速, 得到的测试结果如表 1 所示。

针对本文气助式喷头的气流风速测试方案, 建立基于计算流体力学的数值模型, 图 2b 给出了模型

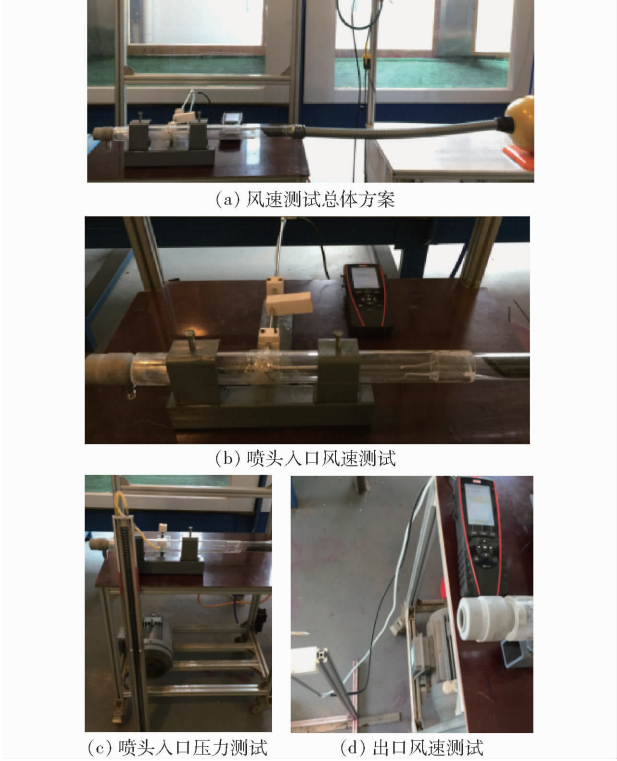


图 3 测试试验现场
Fig. 3 Wind speed test site

表 1 喷头尾部各轴向位置最大风速对比
Tab.1 Test design samples and calculated values
for design goals

与喷头尾端 距离/mm	测试速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	计算速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	误差绝对 值/%
100	44.3	47.9	7.52
150	35.6	37.7	5.57
180	27.8	28.7	3.14
240	19.6	20.4	3.92

中喷头壁面网格示意图(网格模型均采用六面体结构化网格),进行了 CFD 计算,图 4 给出了计算稳定后 xoz 截面的速度分布图。从速度分布图中提取了与喷头尾部不同轴向距离的最大速度,如表 1 所示,并和气流风速测试试验进行了对比。由表 1 可以看出,数值计算和单点测试数据的最大误差保持在 8% 以内,验证了 CFD 三维计算对喷头气流场计算的准确性与有效性。

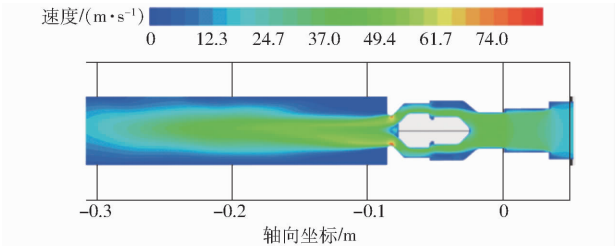


图 4 数值计算 xoz 截面速度云图

Fig. 4 Numerical computation results of xoz section

由图 4 中气助式喷头内部气流场的速度分布可以看出,管道内部气流通过喷头内芯部后气流速度衰减、由于内芯部安装药液喷头,气流经过该结构压缩后压力升高导致气流速度衰减。另外,由于在气助式喷头的末端有一个先收敛后扩张的设计,该设计对出口端面的风速有明显加强作用,对提高气助式喷头风力性能有积极意义;由图 4 也可以看出,气助式喷头尾部气流呈现中间速度小,气流场外边缘速度明显更大的特点;另外,对比表 1 和图 4,CFD 计算和气流场单点风速测试相比,可从内部流动规律出发,描述其工作机理,进而揭示气助式喷头的风力性能。

2.2 两种气助式喷头风力性能的对比分析

针对传统直筒型和本文气助式喷头的两种结构方案,通过数值分析对比研究两种喷头的风力性能。两种喷头的模型切面示意图如图 5 所示,传统直筒型气助式喷头尾部为直筒状,本文气助式喷头尾部有一个先收缩、后扩张的设计。内部结构及尺寸完全一致。

为进一步说明两者结构上的差异,图 6 给出了本文喷头网格划分背景下的结构参数示意图,其中

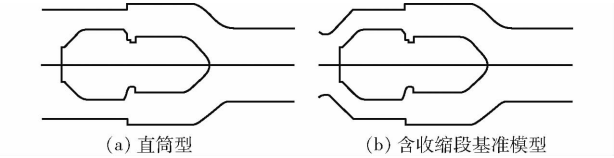


图 5 两种模型示意图

Fig. 5 Schematic of two models

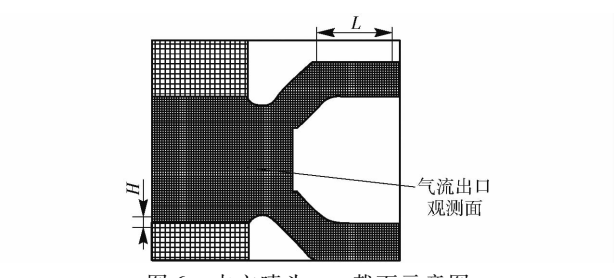


图 6 本文喷头 xoy 截面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of xoy section of a new type of nozzle

两个主要参数为收敛段内缩长度 L (该参数由螺纹控制)及扩张段高度 H 。在喷头尾部出口端面设置观测面,数值计算过程中实时获得该观测面的平均风速。模型入口气流的参数设置为喷雾机额定工作条件下喷头对应参数:总压 105 600 Pa、静压为 105 200 Pa、温度为 300 K。进行瞬态数值计算,0.05 s 后气流发展稳定,图 7 给出了两种模型的出口端面风速分布及平均速度变化规律。图 7c 显示,流场稳定后,直筒型及本文气助式喷头尾部观测面的平均风速分别为 45.8、62.1 m/s,本文喷头出口风速是直筒型喷头对应值的 1.36 倍。另外,图 7a、7b 显示直筒型喷头出口端风速分布不规则,而本文气助式喷头的速度分布更均匀,这是由于喷头加强筋及药液管道扰乱了内部气流的流动均匀性,而本文喷头尾部先收缩、后扩张的结构设计对扰乱的气流有整流作用。经过整流之后,出口端面的气流在径向被分成 3 个圆环,里层和最外层均为低速区、中间为高速区,由气体状态方程可知,低速区气压高、高速区气压低,这种现象对强化低压区雾流的包附、提高对靶性有积极意义。

3 气助式喷头风力性能影响因子分析

通过风速测试和 CFD 计算的对比可看出,CFD 计算通过边界的设置可详细了解气助式喷头内部的流动特征,并描述其工作性能,是对风场单点测试的有效补充。通过 CFD 计算,分析气助式喷头的设计参数对喷射性能的影响。考虑到气流场单点数据有一定随机性,以出口端面的平均速度及流量为指标来衡量气助式喷头的风力性能,分析气助式喷头尾端的扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L (图 6) 对其影响规律。

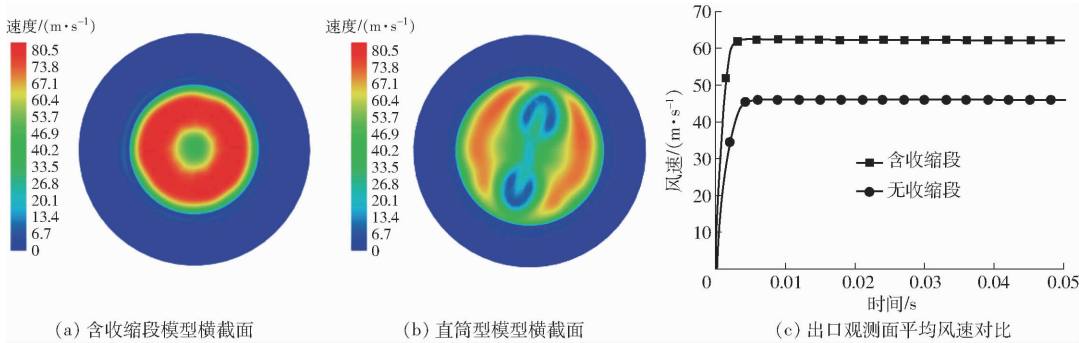


图7 两种模型出口观测面速度对比

Fig.7 Wind speed comparison of exit observation surface for two models

气助式喷头风力性能和设计参数之间的关系呈强非线性,穷举法效率较低且无法完全揭示两者之间的内在关联。本文采用试验设计和 RBFNN,并结合 CFD 计算参数化方法,构建气助式喷头风力性能参数的代理模型;最后,基于该模型对气助式喷头风力性能的影响因子进行分析、优化。

3.1 风力性能代理模型

选用正交性良好、抽样均匀、充满度好的优化拉丁超立方设计^[25]进行试验设计,满足风力性能参数代理模型的 Opt LHD 样本空间如图 8 所示。图中 2 个主要的设计变量为气助式喷头尾端的扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L 。气助式喷头风力性能的流场计算,涉及到几何生成、区域离散、流场计算及后处理等,计算量很大,在对风力性能参数进行优化时,寻优过程耗费的计算成本巨大。建立喷射性能参数精度可靠的代理模型,可显著降低优化过程数值噪声^[26],降低计算成本。

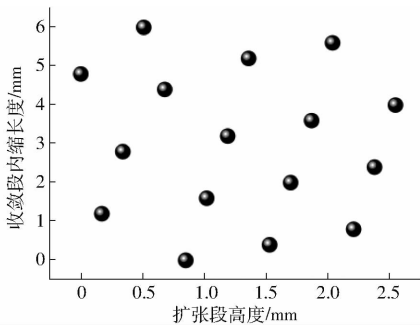


图8 基于优化拉丁超立方的两因数 16 抽样点

Fig.8 16 sampling points for two factors based on Opt LHD

采用和第 2.2 节中相同的网格尺度、入口边界、计算方法,针对图 8 中的抽样样本,结合网格构建、CFD 计算参数化方法,获取每个样本中 2 个风力性能参数的值,结果如表 2 所示。以样本中设计变量为输入,以风力性能参数的计算值为输出,基于 RBFNN 学习方法,编写程序,对输入输出的样本进行训练,建立喷射性能参数的自学习代理模型,并对代理模型进行精度验证,直到代理模型满足精度要求。

表2 试验设计样本与设计目标的计算值

Tab.2 Test design samples and calculated values for design goals

样本编号	扩张段 高度/mm	收敛段内缩 长度/mm	末端平均风 速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	末端流量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.51	6.00	49.6	0.0169
2	0	4.80	56.5	0.0149
3	1.36	5.20	46.1	0.0176
4	0.85	0	63.5	0.0133
5	0.68	4.40	52.7	0.0171
6	1.19	3.20	53.8	0.0165
7	1.02	1.60	60.3	0.0149
8	0.17	1.20	65.1	0.0125
9	1.87	3.60	47.2	0.0156
10	1.53	0.40	59.7	0.0137
11	2.21	0.80	54.1	0.0127
12	2.38	2.40	48.8	0.0133
13	1.70	2.00	53.9	0.0143
14	0.34	2.80	60.2	0.0145
15	2.04	5.60	40.4	0.0168
16	2.55	4.00	44.1	0.0146

基于 RBFNN 的气助式喷头风力性能参数代理模型的精度评价指标为

$$R^2 = \frac{S_E}{S_M} \tag{5}$$

其中 $S_E = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2$ $S_M = \sum_{i=1}^k (\hat{y}_i - \bar{y})^2$
式中 S_E ——总误差平方和
 S_M ——评价样本误差平方和
 m ——试验样本个数
 k ——评价样本个数 ($m = k$)
 $\bar{y}$ ——试验样本响应均值
 $\hat{y}_i$ ——代理数学模型在第 i 个样本点的响应值
 y_i ——试验设计第 i 个样本真实值

经过样本抽样、CFD 计算、RBFNN 拟合^[25],得到满足精度的流量及平均风速的代理模型,如图 9a、9b 所示,出口端流量及平均风速与设计变量的关系呈非线性。图 9c、9d 显示,代理模型 R^2 分别为 0.983 54 和 0.987 28,精度较高。为验证代理模

型的精度,随机抽取 6 组模型进行误差分析,代理模型预测值和计算值的对比如表 3、4 所示,最大相对误差绝对值分别为 2.27% 和 0.67%。以上结果表

明,基于 RBFNN 的代理模型对气助式喷头出口端面流量、平均风速的预测精度较高,满足进一步影响因子分析及风力性能优化。

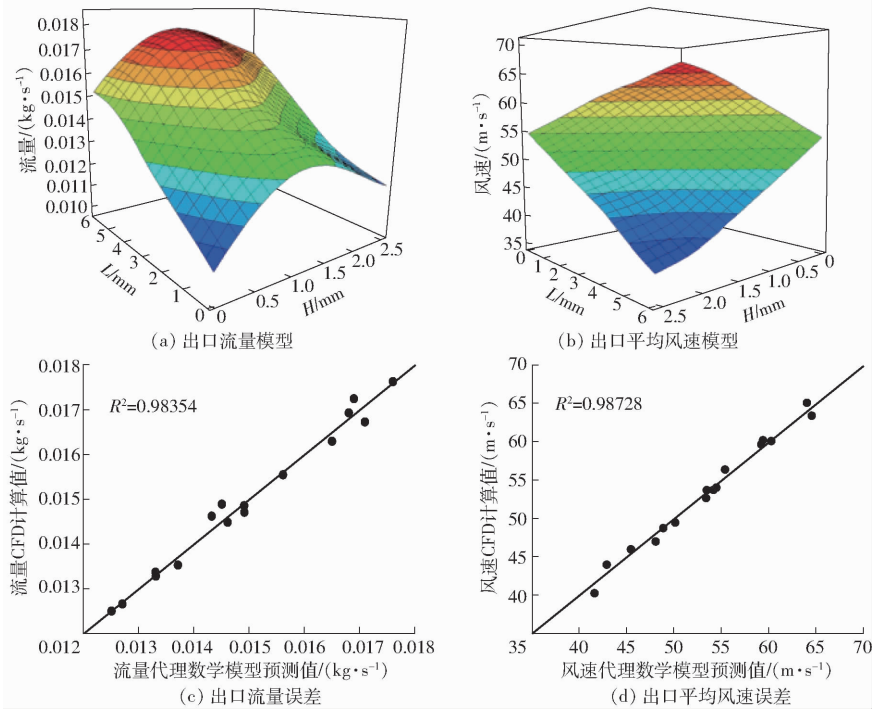


图 9 风力性能参数径向基神经网络模型及误差分析
Fig. 9 RBFNN model and error analysis for wind performance

表 3 流量代理模型的随机误差分析

Tab.3 Random error analysis of flow rate agent model			
随机编号	流量 CFD 计算值/ (kg·s ⁻¹)	流量代理模型预 测值/(kg·s ⁻¹)	相对误差 绝对值/%
1	0.016 9	0.016 9	0
3	0.017 6	0.018 0	2.27
5	0.017 1	0.017 1	0
10	0.013 7	0.013 6	0.74
12	0.013 3	0.013 2	0.76
16	0.014 6	0.014 7	0.68

表 4 风速代理模型的随机误差分析

Tab.4 Random error analysis of wind speed agent model			
随机编号	速度 CFD 计算值/ (m·s ⁻¹)	速度代理模型预 测值/(m·s ⁻¹)	相对误差 绝对值/%
1	49.6	49.7	0.20
3	46.1	46.4	0.65
5	52.7	52.8	0.19
10	59.7	59.3	0.67
12	48.8	49.1	0.61
16	44.1	43.9	0.45

3.2 基于代理模型的风力性能影响因子分析

代理模型训练精度达到要求后,针对扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L 进行喷头风力性能参数的影响因子分析。扩张段高度 $H=0.50\text{ mm}$ 、收敛段内缩长度 $L=0\text{ mm}$ 为基准,独取每个变量以一定幅

度变化,代入代理模型进行计算,研究风力性能参数的变化规律,分析该变量对风力性能参数的影响规律。相对于基准模型,分别将扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L 两变量单独以 5% 的比例递增取值 x_i ,以 $(x_i - x_{\min})$ 和 $(x_{\max} - x_{\min})$ 的比值为横坐标,以风力性能参数代理模型的预测值为纵坐标,作图 10。

图 10a 给出了出口端平均风速对扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L 的响应关系。从图中可以看出,在变量设计范围以内,随着 H 及 L 的增大,出口端面平均风速均呈现下降趋势,其中收敛段内缩长度 L 对其影响更大。主要原因:对于先扩张后收敛的结构,在收敛段气流小于声速时,气流速度逐步增大;在后面扩张段气流仍小于声速时,气流速度逐步衰减^[27]。由图 10a 可以看出,出口端平均风速小于 70 m/s,小于声速,扩张段无加速能力,气流遇到扩张段时,压力增大,速度减小,随着扩张段高度 H 增大,气流平均风速迅速衰减;随着收敛段内缩长度 L 的增加,收敛段环形间隙逐渐减小,气流通过压力损失增大,驱动力不足,导致出口端面平均速度减小。

图 10b 给出了出口端面流量相对扩张段高度 H 及收敛段内缩长度 L 的响应关系。从图中可以看出,在变量设计范围以内,随着 H 及 L 的增大,出口端面流量均呈现先上升后下降的变化趋势,其中, H

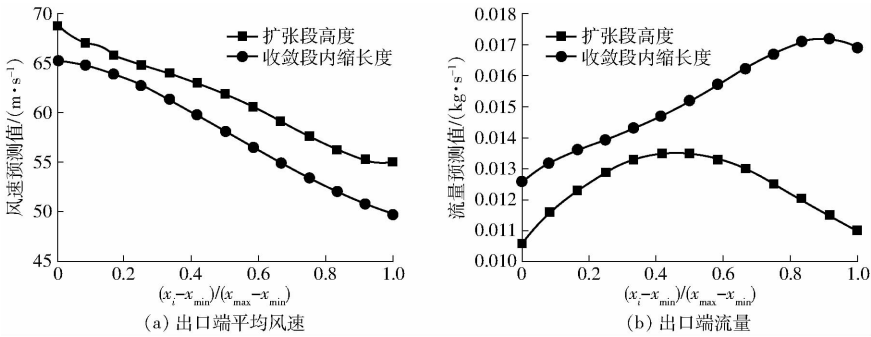


图 10 风力性能指标随结构参数的变化

Fig. 10 Variations of wind performance index with structural parameters

对出口端面流量的影响更大,使其出现的拐点更明显。主要原因:经过扩张段,气流的速度衰减,密度增大^[27],随着 H 的增加,密度增大趋势强于气流速度衰减趋势,流量呈现先上升现象;随着 H 进一步增加,气流速度衰减趋势强于密度增大趋势,流量进而呈现下降现象。另外,经过收敛段,气流速度增加,密度减小^[27],随着 L 的增加,气流速度增加趋势大于密度减小趋势,流量呈现上升现象;随着 L 的进一步增加,密度减小趋势大于气流速度增加趋势,进而流量出现下降现象。

3.3 风力性能参数单目标优化

通过 3.2 节中的分析,风力性能参数出口端面流量 y_1 及平均风速 y_2 和设计变量(尾端扩张段高度 x_1 及收敛段内缩长度 x_2)并非线性关系。鉴于此,本文在多学科平台 Isight 中^[28]采用基于代理模型的多岛遗传算法及序列二次规划梯度算法的组合优化算法^[25]分别对风力性能参数的两个指标进行优化,以达到两个参数的最大值,优化模型为

$$\begin{cases} \max y_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} x_1 \in [0, 2.55] \text{ mm} \\ x_2 \in (0, 6) \text{ mm} \\ y_1 \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \max y_2 = f_2(x_1, x_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} x_1 \in [0, 2.55] \text{ mm} \\ x_2 \in [0, 6] \text{ mm} \\ y_2 \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

如图 11 所示,该组合优化策略能有效发挥这两种优化算法的优势,反复迭代,直到逼近全局最优解。采用组合优化策略对风力性能两个参数的优化结果如表 5 和表 6 所示。表中给出了两个参数的优化值,及对应的设计变量参数。

表 5 显示,当设计参数 $H = 1.08 \text{ mm}$ 、 $L = 5.39 \text{ mm}$ 时,出风量达到最大值 0.0179 kg/s ,相对于基准值提高了 20.13%;同时针对流量优化后的设计参数值,采用代理模型计算的末端平均风速为 47.9 m/s ,

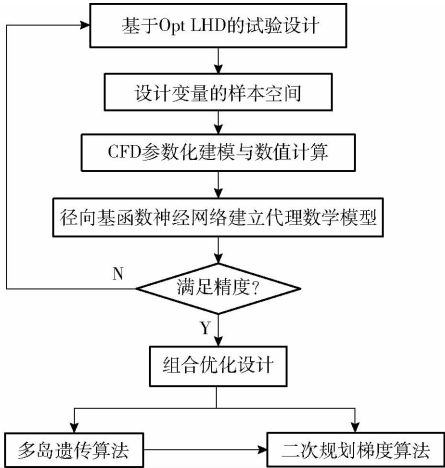


图 11 基于代理数学模型的组合优化策略

Fig. 11 Combination optimization strategy based on agent mathematical model

表 5 流量优化后结果对比

Tab. 5 Result comparison after flow optimization			
模型类型	收敛段内缩 长度/mm	扩张段高度/ mm	末端流量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
基准模型	0	0.50	0.0149
流量优化	5.39	1.08	0.0179
CFD 计算	5.39	1.08	0.0182

表 6 风速优化后结果对比

Tab. 6 Result comparison after wind speed optimization			
模型类型	收敛段内缩 长度/mm	扩张段高度/ mm	末端风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
基准模型	0	0.5	67.1
风速优化	0	0	67.9
CFD 计算	0	0	67.8

相对于基准模型下降了 28.60%。另外,为验证优化结果可靠性,针对优化后的设计参数,进行了数值计算,结果显示,基于多学科平台 Isight 的风力性能参数值相对于数值计算值的误差较小,流量及平均风速的相对误差分别为 1.68%、2.51%。

表 6 显示,根据出口端面平均风速优化后的结果,当设计参数 $H = 0 \text{ mm}$ 、 $L = 0 \text{ mm}$ 时,平均风速达到最大值 67.9 m/s ,相对于基准值有一定提高;同时针对风速优化后的设计参数值,采用代理模型计算

的末端风量为 0.010 7 kg/s,相对于基准模型下降了 28.20%。另外,为验证优化结果可靠性,针对优化后的气助式喷头设计参数,进行了数值计算,结果显示,基于多学科平台 Isight 的风力性能参数值相对于数值计算值的误差较小,流量及平均风速的相对误差分为 1.87%、0.14%。

可以看出,在喷头入口参数一定的情况下,出口端面流量、平均风速的极大值优化是一对矛盾的问题。

3.4 风力性能参数优化后的流场对比分析

针对 3.3 小节中两个风力性能参数优化后对应

的设计变量值,进行了包括基准模型在内的 3 种工况的计算。图 12 给出了基准模型和两组优化模型数值计算稳定后 1.02 s 时刻无障碍(无药液入口、筋板)切面的速度分布云图。由图 12 可以看出,基于流量优化的该切面速度极值最大、基准模型速度极值次之、基于风速优化的该切面速度极值最小;速度极值均出现在收敛段结束、扩张段开始时;3 种工况中,基于风速优化的出口端平均风速最大、基准模型出口端平均风速次之、基于流量优化的出口端平均风速最小。

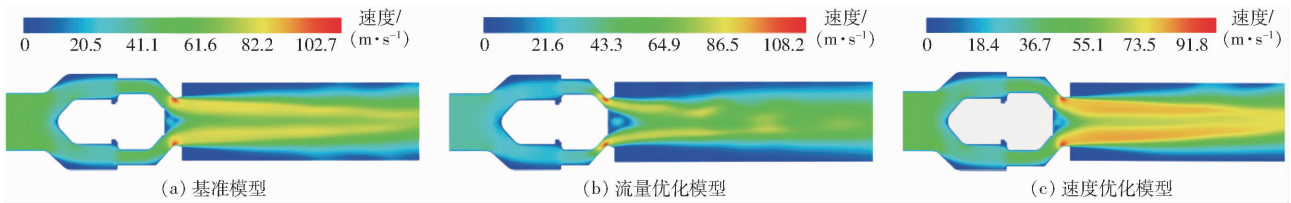


图 12 优化模型及基准模型无障碍切面在 1.02 s 时刻风速对比

Fig. 12 Wind speed comparison of barrier-free cross-section for optimization model and benchmark model at 1.02 s

图 13 给出了 3 种工况数值计算稳定后 1.02 s 时刻含障碍物切面的速度分布云图。结合图 1 可知,图 13 中 3 张速度云图下方障碍为接入药液的圆柱形管道,上方为窄长方体加强筋。由图中可以看出,3 种工况该切面的上下两侧风速分布不对称性明显,由于接入药液的圆柱形管道占据的流道空间更大,空气受到的挤压效应更明显,出口端面的风速更大,使得在运输过程中,3 幅云图下方的风速显著

高于上方,故高速区压力小,和下方大气压的压差更大,受到的升力更大。鉴于此,在作业时,建议将接入药液的圆柱形管道放在下侧,这对于提升雾滴受到的升力,防止雾滴由于重力的作用而过早落于地面,进而提高雾滴输运距离、增加沉积量有积极作用。

另外,对比图 12 和图 13 可知,障碍物对气助式喷头内部风场扰动明显,使得含障碍物切面的外部风场波动也更显著。

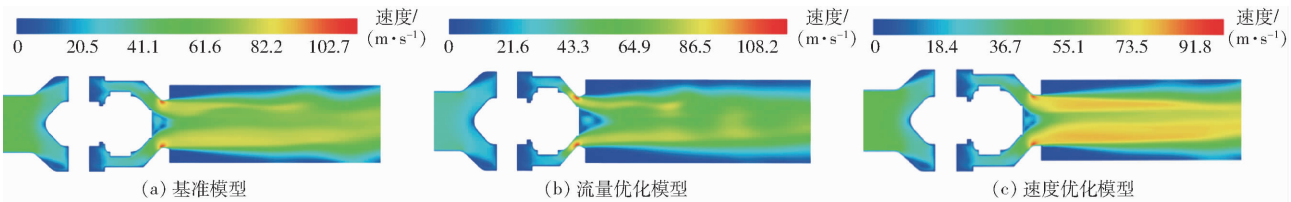


图 13 优化模型及基准模型有障碍切面在 1.02 s 时刻风速对比

Fig. 13 Wind speed comparison of free cross-section for optimization model and benchmark model at 1.02 s

3.5 风力性能参数多目标优化

从 3.3、3.4 节中的分析可知,出口端平均风速和流量两个目标是互相矛盾的,寻求其中一个目标的极大值,必导致另一个目标减小。实际工作参数的选择应该综合考虑这两个目标,鉴于此,以两个风力性能参数为目标进行如图 14 所示的多目标优化,建立多目标优化数学模型

$$\begin{cases} \max y_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \max y_2 = f_2(x_1, x_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} x_1 \in [0, 2.55] \text{ mm} \\ x_2 \in [0, 6] \text{ mm} \\ y_1 \geq 0 \\ y_2 \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

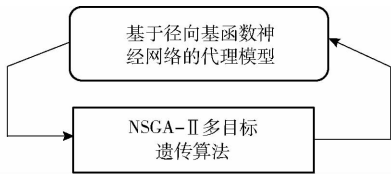


图 14 基于代理数学模型的多目标优化

Fig. 14 Multi-objective optimization based on agent mathematical model

结合非劣排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)^[29-30]、风力性能参数代理数学模型建立多目标优化框架。NSGA-Ⅱ算法使用带有精英策略的非劣排序和简单的拥挤算子,不需要定义参数来保持种群多样性,计算效率高。NSGA-Ⅱ参数设置:种群规模为 100,进化代数数为 100,交叉概率 P_c 为 0.9,交叉分配指数 η_c 为 20,交叉分配指数 η_m 为 100。经过 100 代进化

运算,得到 2 个优化目标的 Pareto 解集分布,如图 15 所示。

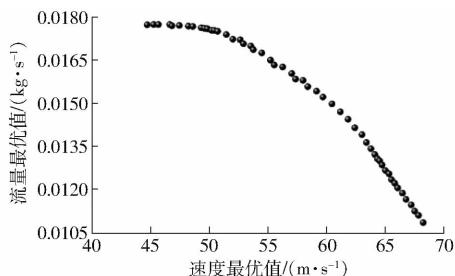


图 15 风力性能参数多目标优化 Pareto 解集

Fig. 15 Multi-objective Pareto set solution for wind performance parameters

在不同果园环境、不同果树生长期中,冠层穿透所需风量和速度匹配不一样,决定了作业过程中两个作业参数的权重。在图 15 中,纵坐标(流量最优值)和横坐标(速度最优值)均为最优值,即当需求流量为纵坐标最优值时,风速最大能达到横坐标最优值与之对应。在 Pareto 解集空间(f_1, f_2)里,根据各目标的重要程度,采用权重 $w = (w_1, w_2)$ 决定的一个方向作等值线,等值线与 Pareto 解集线的切点,就是所需要的多目标最优解。

4 结论

(1)针对风速测试方案,建立了新型气助式喷

头气流量 CFD 模型,结合轴线方向的风速测试验证了 CFD 计算的可靠性,风速计算、试验值的误差控制在 8% 以内。在相同入口参数下,通过 CFD 计算对比了新型及直筒气助式喷头尾部观测面的平均风速,分别为 62.1、45.8 m/s,提升到 1.36 倍。

(2)建立了风力性能参数出口端面流量、平均风速的代理模型, R^2 分别为 0.983 54、0.987 28。风力性能参数对设计变量扩张段高度 H 、收敛段内缩长度 L 较敏感。在变量设计范围内,随着 H 及 L 增大,出口端平均风速均呈下降趋势;随着 H 及 L 增大,出口端流量均呈先上升后下降的趋势,其中,扩张段高度 H 对出口端面流量的影响更大,出现的拐点更明显。

(3)对两个风力性能参数进行了单目标优化,取值 $H = 1.08$ mm、 $L = 5.39$ mm 时,出风量达到最大值 0.017 9 kg/s,相对基准值提高了 20.13%,此时平均风速下降 28.60%;取值 $H = 0$ mm、 $L = 0$ mm 时,平均风速达到最大值 67.9 m/s,相对于基准值有一定提高,而风量下降了 28.20%。

(4)对两个风力性能参数进行了多目标优化,得到了出口端面流量、平均风速的最优解集,为不同果园的气助式喷头优化匹配设计提供了参考依据。

参 考 文 献

- 吕晓兰,张美娜,常有宏,等. 果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 81–87.
LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, CHANG Youhong, et al. Influence of deflector angles for orchard air-assisted sprayer on 3D airflow distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 81–87. (in Chinese)
- 宋坚利,何雄奎,张京,等. “Ⅱ”型循环喷雾机设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 31–36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120407&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.007.
SONG Jianli, HE Xiongkui, ZHANG Jing, et al. Design of Ⅱ-type recycling tunnel sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 31–36. (in Chinese)
- 邱威,丁为民,汪小岳,等. 3WZ-700 型自走式果园风送式喷雾机[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 26–30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120406&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.006.
QIN Wei, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 26–30. (in Chinese)
- 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 18–25.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 18–25. (in Chinese)
- 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)
- 宋淑然,陈建泽,洪添胜,等. 果园柔性对靶喷雾装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 57–63.
SONG Shuran, CHEN Jianze, HONG Tiansheng, et al. Design and experiment of orchard flexible targeted spray device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 57–63. (in Chinese)
- 周良富,傅锡敏,丁为民,等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64–71.
ZHOU Liangfu, FU Ximin, DING Weimin, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 64–71. (in Chinese)
- 宋淑然,夏侯炳,刘洪山,等. 风送式喷雾机喷筒结构优化数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 73–78, 55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130614&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.014.

- SONG Shuran, XIA Houbing, LIU Hongshan, et al. Numerical simulation and experiment of structural optimization for air-blast sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 73–78, 55. (in Chinese)
- 9 宋淑然, 夏侯炳, 卢玉华, 等. 风送式喷雾机导流器结构优化及试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 7–12.
- SONG Shuran, XIA Houbing, LU Yuhua, et al. Structural optimization and experiment on fluid director of air-assisted sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 7–12. (in Chinese)
- 10 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 果园仿型变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56–63.
- LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 56–63. (in Chinese)
- 11 DELELE M A, JAEKEN P, DEBAER C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55: 16–27.
- 12 DELELE M A, MOOR A D, SONCK B, et al. Modeling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 165–174.
- 13 DELELE M A, MOOR A D, VERBOVEN P, et al. CFD modeling of air flow patterns from an air assisted orchard sprayer[J]. Aspects of Applied Biology, 2004, 71(2): 303–310.
- 14 ENDALEW M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying-Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 128–136.
- 15 ENDALEW M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying-part II: validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 137–147.
- 16 徐立章, 于丽娟, 李耀明, 等. 双风出口多风道离心风机内部流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 78–86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.013.
- XU Lizhang, YU Lijuan, LI Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 78–86. (in Chinese)
- 17 邱威, 顾家冰, 丁为民, 等. 果园风送式喷雾机防治效果试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 94–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.014.
- QIU Wei, GU Jiabing, DING Weiming, et al. Experiment on control effect of different pesticide concentration using air-assisted sprayer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 94–99. (in Chinese)
- 18 何雄奎, 曾爱军, 何娟. 果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 75–77.
- HE Xiongkui, ZENG Aijun, HE Juan. Effect of wind velocity from orchard sprayer on droplet deposit and distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 75–77. (in Chinese)
- 19 傅泽田, 王俊, 祁力钧, 等. 果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 69–74.
- FU Zetian, WANG Jun, QI Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air-velocity distribution of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 69–74. (in Chinese)
- 20 牛钰森. 自发式发射内弹道流场特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- NIU Yusen. Research on internal ballistic flow field characteristics of self-eject launch [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- 21 ORSZAG S A, YAKHOT V, FLANNEY W S. Renormalization group modeling and turbulence, in international conference on near-wall turbulent flows[C]//Proceedings of the International Symposium on Mathematical Modeling of Turbulent Flows, 1995.
- 22 杨风波, 马大为, 任杰, 等. 新型车载同心筒流场机理与热环境研究[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(3): 301–306.
- YANG Fengbo, MA Dawei, REN Jie, et al. Research on flow field mechanism and thermal environment of a new vehicle-carried concentric canister launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(3): 301–306. (in Chinese)
- 23 VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamic: the finite volume method[M]. 2nd Edition, Englewood, NJ: Prentice Hall, 2007.
- 24 杨风波, 马大为, 薛新宇, 等. 新型路基同心筒热冲击机理与热环境影响因子[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 153–160.
- YANG Fengbo, MA Dawei, XUE Xinyu, et al. Thermal shock mechanism and thermal environment influencing factors of a new concentric canister launcher[J]. Explosive and Shock Waves, 2016, 36(2): 153–160. (in Chinese)
- 25 杨风波, 马大为, 任杰, 等. 新型同心筒自力发射热环境优化设计[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2): 172–178.
- YANG Fengbo, MA Dawei, REN Jie, et al. Optimization design for thermal environment of a new roadbed concentric canister launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(2): 172–178. (in Chinese)
- 26 虞跨海, 杨茜, 倪俊, 等. 基于响应面的涡轮叶片冷却通道设计优化[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1630–1634.
- YU Kuahai, YANG Xi, NI Jun, et al. Coolig passage design optiminzation of turbine blades based on response surface methodology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1630–1634. (in Chinese)
- 27 武晓松, 陈军, 王栋. 固体火箭发动机气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- 28 崔龙飞, 薛新宇, 秦维彩. 基于 EBF 神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 62–69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160509&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.009.
- CUI Longfei, XUE Xinyu, QIN Weicai. Parameter optimization on crop divider of cotton defoliation sprayer based on EBFNN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 62–69. (in Chinese)
- 29 DEB K. Multi-objective optimization using evolutionary algo rithms[M]. Chichester: Wiley, 2001: 273–286.
- 30 DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 16(2): 182–186.