

考虑自然风的气辅式喷雾雾滴飘失特性建模与补偿

苑进^{1,2}, 刘雪美^{1,2*}, 张晓辉^{1,2}, 左文龙¹, 王秀³, 陈立平³

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺与装备重点实验室, 泰安 271018;

3. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 气流辅助喷雾在雾滴减飘方面确有效果, 然而大田作业时, 其减飘效果受到自然风、喷雾流量、风筒出口风速、喷雾角等多种工况的严重影响。该文采用多相流计算流体动力学软件, 建立三维流场几何模型, 依据不同工况参数对雾滴漂移特性的影响, 利用均匀设计安排试验方案, 研究雾滴在自然风、辅助气流综合作用下在连续相和雾滴粒子离散相的耦合规律, 通过流体动力学仿真完成训练样本采集, 采用多元相关向量机回归方法建立不同自然风速下减飘模型, 并通过模糊决策支持系统对作物茂密程度和喷嘴与冠层间垂直距离进行控制参数修正。试验结果表明: 多元相关向量机回归模型预测飘失率的平均绝对百分比误差为 2.56%, 自然风扰动中实测和预测飘失率平均误差为 8.92%, 其飘失规律与所建飘失模型基本吻合。研究结果可为面向雾滴沉积效果的喷雾主动控制系统设计提供参考。

关键词: 喷雾, 流场, 模型, 防飘, 多工况, 气辅式喷杆喷雾机

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.006

中图分类号: S49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0045-08

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 45—52. (in Chinese with English abstract)

0 引言

气辅式喷雾技术能够增强作物枝叶翻转, 增大雾滴穿透性, 能较好地减少液滴漂失, 有利于提高作物中下层的雾滴沉积率, 显著减少施药用量^[1]。为了充分利用风幕式气助喷雾的优点, 国内外学者从不同角度对雾滴的飘失过程及影响因素展开了大量试验研究, 试图全面深入地认识雾滴飘失的机理, 并通过调整气助式喷杆喷雾机气流及出口参数、喷嘴工作参数等方法减少农药的飘失损失, 改进药液空间分布特性^[2-5]。研究表明, 当具备自然风速和温湿度作业条件时, 气辅式喷雾在雾滴减飘方面确有效果, 但在大田作业时, 其雾滴沉积和减少药液飘失效果也受到多种因素

影响: 如自然风速、药液流量、雾滴直径、风筒风量和出口风速、作物冠层茂密程度、喷头与冠层的垂直距离, 喷雾方向与辅助气流的夹角(以下简称喷雾角)等。比如自然风速较小时, 采用较大的风筒风量和出口风速, 不但增加不必要的风机功耗, 而且将雾滴直接吹向地面, 药液流失严重; 自然风速较大时, 辅助气流风量和风速若不足以克服自然风的影响, 雾滴会随自然风飘失。

Cooke 等^[6]比较了液力喷头喷雾与风帘式气助喷雾在作物中的雾滴飘失情况, 并指出除非优化辅助气流速度、作物冠层上的喷雾高度等参数, 气流辅助喷雾的防飘能力将下降。Bukovac^[7]指出: 气辅式喷雾系统中风帘的优势随着雾滴尺寸的增大而减弱。Hislop 等^[8]报告: 气力辅助喷雾在风速为 4 m/s 的风洞试验中能大量的减少飘失; Howard 等^[9]讨论了当气流方向沿机器前进速度方向向前和向后 45°, 风速为 1 和 2 m/s 时, 雾滴易脱离靶标飘失。Rocamora 等^[10]研究了气辅式喷雾机在冠层稠密作物的喷施效率, 给出了气流出口角度、喷雾喷头和药液流量与雾滴数量和沉积率的关系, 采用推广线性模型对其建模, 并分析了气助喷雾机在洋葱上的喷施效率。但该工作仅仅局限于受喷头类型等影响的喷雾效果, 并未考虑作业环境变化如自然风、喷

收稿日期: 2013-01-14 修订日期: 2013-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(31101461)、山东省自然科学基金(ZR2011CQ021, ZR2012CM035)、山东省高等学校科技计划(J11LC27)、国家农业智能装备工程技术研究中心开放课题(KFZN2012W09-009)和山东省现代农业产业技术体系创新团队岗位专家资助项目

作者简介: 苑进(1972—), 男, 山东泰安人, 副教授, 博士, 主要从事智能农机装备技术研究。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018。Email: jyuan@sdaue.edu.cn

*通信作者: 刘雪美(1973—), 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事精准植保装备研究。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018。Email: lxmywj@126.com

杆高度等因素对喷雾效果的影响。

近年来,应用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)解决药液喷施问题已经成为植保领域精准喷施技术研究的重要课题。张铁等^[11]采用 CFD 技术研究了超高地隙喷杆喷雾机风幕式气流辅助施药技术的雾滴沉积飘失情况。Baetens 等^[12]采用三维稳态模型研究了不同喷杆高度、自然风速、风向以及风幕风速对喷雾减飘和沉积的影响,并对照了田间试验验证。该模型可以较准确地预测 5 m 内的雾滴飘失情况,同时指出:考虑更多环境条件的动态模型对于实际减飘和沉积具有更重要的指导意义。Nuytens 等^[13]提出了采用三维 CFD 喷雾飘失模型,该模型同时考虑雾滴特性、气象条件、药液特性、冠层结构和作物特点等综合因素,并进行了田间试验,证明 CFD 三维仿真模型是辅助田间减飘试验的有效途径。

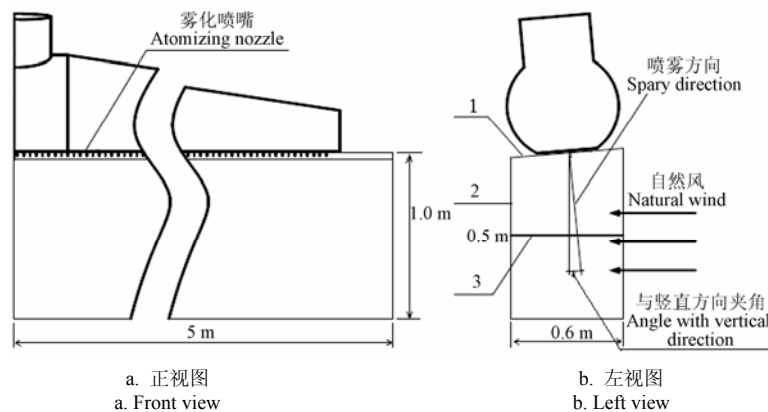
风洞试验具有成本高和试验复杂等缺点,在一定程度上限制了考虑自然风影响的辅助气流喷雾

特性的精确建模。本文采用三维流场的多相流 CFD 模型,研究雾滴在自然风影响、辅助气流胁迫和自身重力作用下在连续相和雾滴粒子群离散相耦合的交互作用,并对不同工况参数下气流辅助喷雾下雾滴漂移特性建模,为实现具有确切施药效果的主动控制技术提供控制参数决策模型。

1 考虑自然风的气辅式喷雾 CFD 模型

1.1 CFD 几何建模

为了使仿真工况与实际试验条件相同,建立了风筒幅宽为 8 m 的三维仿真^[14]模型,同时将气助风筒出口口距离地面 1 m 内的三维自由流动区作为计算区域。在满足 CFD 计算精度前提下,为了减少计算负荷,将三维流场几何模型在喷杆方向的对称面上进行简化,取为物理模型的 1/2 (见图 1)。由于大田作业中机具运动反方向的自然风对雾滴飘失影响最为严重,因此本文仅研究与喷杆运动负方向的水平自然风对雾滴群的影响,忽略喷杆方向自然风分量。



注: 1 和 2 为雾滴或气流的出口平面,用于雾滴飘失评价; 3 为距风筒出口 0.5m 处平面,用于雾滴沉积评价。

Note: 1 and 2 are outlet planes of droplets or airflow for drift evaluation, 3 is plane with vertical distance 0.5m to outlet of duct for droplet deposition evaluation.

图 1 离散相仿真几何模型

Fig.1 Geometric model of discrete-phase simulation

为避免模型过于复杂和计算负荷过于庞大,试验选取喷杆中 17 个喷嘴中的 1 个作为分析对象。考虑到实际工况下喷杆方向产生的喷雾压力和风幕出口风速的变化,在建立全部喷嘴的雾滴飘失模型时,可根据本文的回归模型依据不同喷嘴的喷雾压力和辅助气流风速计算出反映相应喷嘴处的雾滴飘失率等参数^[15-16]。

1.2 喷嘴雾化及离散相仿真模型

在气辅式风筒的出口垂直方向安装喷头,如图 1 所示。在气辅式连续相流场分析^[17]的基础上,离散相仿真需加入粒子喷射源进行连续相与离散相耦合的流动参数计算。样机所采用的 TeeJet 公司的不锈钢材质的防飘移均匀扇形喷头 DG9504EVS,工作压力范围 2.0~4.0 kg,对应的喷雾流量范围 1.29~1.82 L/min,喷雾角为 110°。依

据该喷头雾化特性在 CFD 分析中采用平板扇形雾化模型,并根据喷头特性设置其边界条件,使粒子发生器随机产生粒子直径按照 R-R 分布,然后使用液滴运动方程计算各粒子的运动轨迹,液滴之间的相互作用依据液滴碰撞和破碎模型进行解算^[18]。

雾滴的位置(离散相)使用拉格朗日粒子跟踪多相流模型^[18]。连续相和离散相有各自独立的边界条件,其中风筒进口和自然风进口采用速度进口边界条件,连续相流场出口采用压力出口边界条件。

离散相的边界行为分为反射、捕捉和逃逸 3 种模型。捕捉模型假定离散相粒子与壁面碰撞时,粒子被壁面捕捉;逃逸模型假定离散相粒子与边界面碰撞后离开计算区域,不再返回流场,此模型常用于流场的出口和进口处。由于本文分析模型仅关注雾滴在作物沉积前的分布情况,因此虽然液滴喷施到作物表面上,

但本文未考虑作物叶面对流场形成的影响。当侧风较小时, 液滴跌落到地面, 因粒子较小, 与地面反弹后对作物上方的计算区域影响很小, 故将地面上的边界条件采用“捕捉”边界, 即粒子若到达地面将被地面捕捉。在下风向等压力出口处粒子按逃逸模型计算。

1.3 雾滴飘失和沉积性能评价指标

本文通过统计雾滴到达仿真几何模型的 3 个面 (见图 1) 以定量评估雾滴飘失性能。由于本文忽略喷杆方向自然风分量, 即不考虑雾滴在喷杆方向的运动, 故雾滴的运动方向只有 2 种, 一种是在自然风和风幕的共同作用下, 直径小、速度低的雾滴向下风向运动, 部分雾滴未能到达作物冠层就飘失了, 故统计通过面 1 和面 2 的粒子记为雾滴飘失。另一种是雾滴到达作物冠层实现雾滴沉积, 故统计穿过面 3 (作物冠层与喷头间距为 0.5 m 计) 的粒子记为雾滴沉积。飘失粒子的质量 m_1 由下式计算^[17]

$$m_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \rho \frac{4}{3} \pi r_i^3 n_i \quad (1)$$

式中, N_1 为通过图 1 中平面 1、2 飘失的粒子包个数; ρ 为液滴的密度, kg/m^3 ; n_i 为第 i 个粒子包中粒子个数; r_i 为第 i 个粒子包中的粒子半径, m。通过平面 3 的粒子质量 m_2 可用式 (2) 计算

$$m_2 = \sum_{i=1}^{N_2} \rho \frac{4}{3} \pi r_i^3 n_i \quad (2)$$

式中, N_2 为通过图 1 中平面 3 的粒子包个数; m_2 为未飘失的粒子的质量, kg。

雾滴飘失率 η 的定义为

$$\eta = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \quad (3)$$

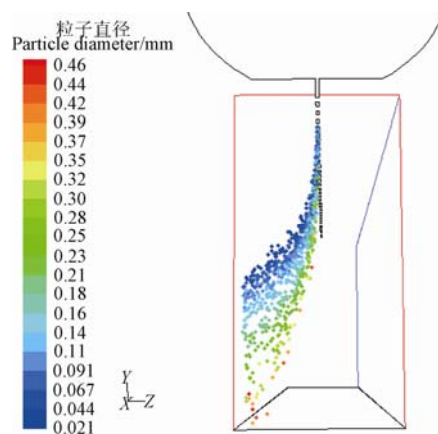
评估方法: 在 CFD 中定义雾滴收集平面, 采用 CFD 中 DPM 模型的 DEFINE_DPM_OUTPUT 宏统计流过目标平面的所有粒子包以及粒子包的信息。所收集粒子包的信息包括 x 、 y 、 z 坐标、粒子包内的粒子个数、直径等, 利用粒子包内粒子的信息, 分别统计通过平面 1、2、3 的粒子质量, 再采用式 (3) 计算飘失率。

本文暂未考虑雾滴与作物枝叶间的交互作用, 因而采用流过平面 3 的雾滴的垂直向下的速度分量作为雾滴沉积和穿透性的性能评价。雾滴向下速度分量越大, 表明辅助气流对雾滴的加速作用也较大, 因而雾滴在作物冠层的沉积性和对作物的穿透性也越好。但是由于冠层茂密程度影响着作物下层枝叶的雾滴沉积性和穿透性, 因此需要进行建模补偿。

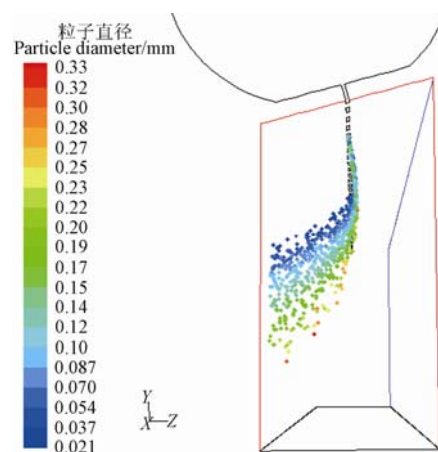
1.4 典型喷雾仿真与评价示例

当喷雾过程中存在自然风的扰动时, 直径较小的雾滴运动方向和喷射方向偏移大, 飘失严重, 反

之雾滴飘失较小。图 2 给出了 2 种工况下, 在自然风和辅助风幕的综合作用下的雾滴粒径分布图。依据仿真结果中给出的各粒子的位置、直径和速度信息, 采用式 (3) 计算出工况一的雾滴飘失率为 29.99%, 即有 70.01% 的药液能够穿过平面 3 喷洒到作物叶面上, 并且有效喷雾雾滴具有的向下速度为 4.5778 m/s; 工况二的雾滴飘失率为 78.60%, 即仅有 21.40% 的药液能够穿过平面 3 喷洒到作物叶面上, 此时其有效喷雾雾滴具有的向下速度为 4.8516 m/s。从粒子的运动轨迹看, 减小雾滴飘失, 一方面可提高辅助风幕的风速, 提高夹带雾滴的能力, 另一方面可适当在线减小药液压力, 提高雾化雾滴的平均直径, 提高雾滴动能, 同时, 也可调整雾滴喷射方向, 使雾滴水平方向的动能和自然风的能量相抵消, 提高防飘效果。



a. 工况一下的雾滴粒径分布
a. Droplet diameter distribution under condition one



b. 工况二下的雾滴粒径分布
b. Droplet diameter distribution under condition two

注: 工况一的试验参数为: 自然风速 4 m/s、喷雾流量 0.03339 kg/s、喷雾角 0°、进口风速 10 m/s; 工况二的试验参数为: 自然风速 8 m/s、喷雾流量 0.03339 kg/s、喷雾角 15°、进口风速 12 m/s。

Note: Condition parameters shown in Fig.a are wind speed 4 m/s, spray flow 0.03339 kg/s, spray angle 0°, air-assisted velocity 10 m/s. Condition parameters shown in Fig.b are wind speed 8 m/s, spray flow 0.03339 kg/s, spray angle 15°, air-assisted velocity 12 m/s.

图 2 雾滴粒径分布图

Fig.2 Droplet diameters distribution

2 多工况喷雾雾滴飘失特性建模与补偿

借助 CFD 仿真结果,通过多元相关向量机回归^[19](multivariate relevance vector machines regression)的响应面建模技术,建立喷杆喷雾机工作参数与喷雾性能的非线性映射关系模型,然后将该模型中不便考虑的其他变量通过模糊逻辑系统对模型参数补偿,以便实现喷雾过程的主动控制。

2.1 四因素五水平均匀设计仿真方案

影响农药雾滴飘失的因素很多,如自然风速、喷雾压力、风筒出口风速和风量、作物冠层茂密程度、喷头与冠层的垂直距离,喷雾方向与辅助气流的夹角(喷雾角)等。由于喷雾压力直接影响喷雾流量,进而显著影响雾化粒子直径的分布。本文以影响较为显著的4个因素:自然风风速(m/s)、药液流量(kg/s)、风筒进口风速(m/s)和喷雾角(°)作为CFD仿真的影响因素,依据大田作业环境及喷雾机工况,确定其工况参数范围为:自然风速0~8 m/s,流量30~0.03339 kg/s,喷雾角度0~20°,进口风速4~12 m/s,将上述因素取为5个水平,采用四因素五水平中心化 L_2 -偏差的均匀设计表^[20] $U_{25}(25^4)$ 作为CFD分析方案(见表1)。

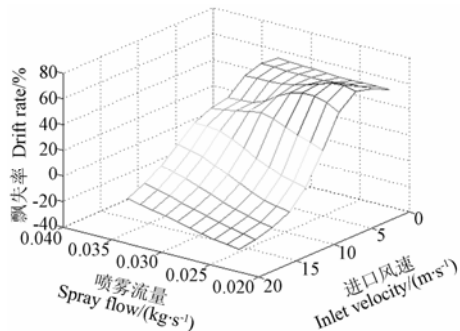
2.2 雾滴飘失特性建模

由于多元相关向量机回归在小样本集下仍具有较高的泛化能力,因此训练好的多元相关向量机回归能实现对气辅式喷雾机在多工况下的喷雾性能进行有效评价。使用上述基于均匀设计的CFD仿真结果作为多元相关向量机回归学习的训练样本集,使用正

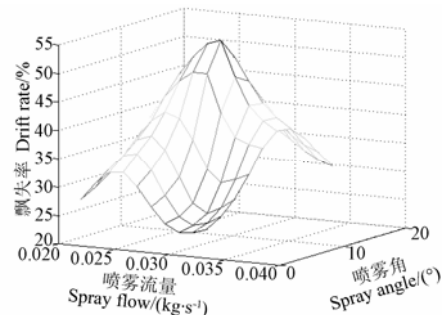
则化参数和核参数的网格搜索方法选择多元相关向量机回归的最优模型,以获取多元相关向量集合以及最优模型参数。建立以自然风速、药液流量、风筒进口风速和喷雾角为输入量,0.5 m处平面的飘失率和粒子平均铅垂方向分速度为输出量的4输入2输出多元相关向量机回归模型。为了模型可视化,固定其中的2个工况参数在其中值位置,其余2个参数与输出参数的三维映射关系如图3所示。

表1 多工况 CFD 仿真均匀设计 $U_{25}(25^4)$ 方案

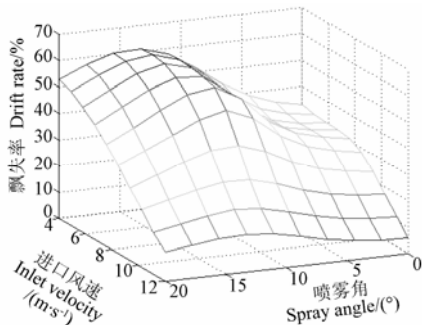
Table 1 Uniform design of CFD Simulation of Multi-state				
试验号 No. of test	自然风速 Wind speed/(m·s ⁻¹)	喷雾流量 Spray flow/(kg·s ⁻¹)	喷雾角 Spray angle/(°)	进口风速 Inlet velocity/(m·s ⁻¹)
1	4	0.03339	0	10
2	4	0.02520	20	12
3	8	0.02835	5	10
4	8	0.03339	15	12
5	8	0.02520	10	6
6	0	0.02205	0	6
7	4	0.02205	15	4
8	4	0.03087	5	6
9	6	0.03339	10	4
10	2	0.03087	15	8
11	6	0.03087	20	10
12	2	0.02835	0	12
13	0	0.03339	5	8
14	8	0.03087	0	4
15	6	0.02520	0	8
16	2	0.02205	10	10
17	6	0.02835	15	6
18	0	0.03087	10	12
19	6	0.02205	5	12
20	8	0.02205	20	8
21	2	0.02520	5	4
22	4	0.02835	10	8
23	0	0.02835	20	4
24	0	0.02520	15	10
25	2	0.03339	20	6



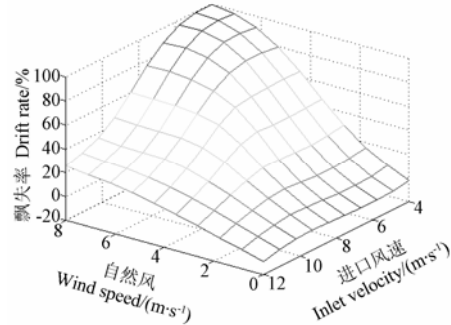
a. 自然风速 4 m/s, 喷雾角 10°
a. Wind speed is 4 m/s, spray angle is 10°



b. 自然风速 4 m/s, 进口风速 8 m/s
b. Wind speed is 4 m/s, inlet velocity is 8 m/s



c. 自然风速 4 m/s, 喷雾流量 0.0277 kg/s
c. Wind speed is 4 m/s, spray flow is 0.0277 kg/s



d. 喷雾流量 0.0277 kg/s, 喷雾角 10°
d. Spray flow is 0.0277 kg/s, spray angle is 10°

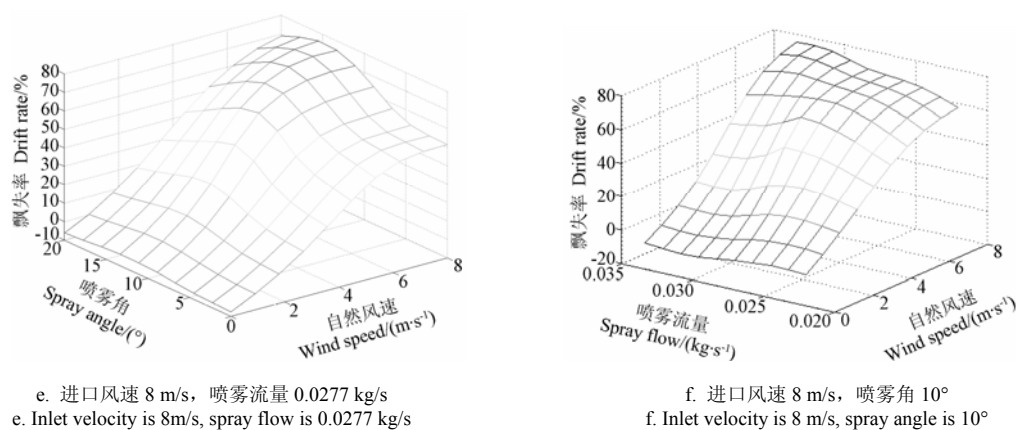


图 3 工况参数与雾滴飘失率的映射关系

Fig.3 Mapping relations of working parameters with droplet drift loss rate

从图 3a 可以看出, 辅助气流的风速相对于雾滴直径对飘失率的影响要大的多。从图 3b 可以看出, 自然风速, 进口风速不变时, 雾滴直径和喷雾角存在一个使飘失率最小的区域, 但若两者参数匹配不好, 也会存在一个飘失率的最大值区域。结合图 3c 和图 3e 看, 喷雾角的调整对减少雾滴飘失率无显著效果。从图 3d 可以看出, 在自然风不大时, 辅助气流对飘失率的影响不大。当自然风速居中时, 增大辅助气流进口风量, 提高出口风幕风速, 可胁迫雾滴朝向靶标运动, 从而减少雾滴飘失率。但当自然风过大时, 辅助气流的减飘作用非常不明显。因此结合图 3d 和图 3f 看, 在喷雾工况范围内, 气辅式风筒进口风速越大越好, 自然风速越小越好, 药液压力相对较小更有利于其抵抗飘失。由于喷雾压力和流量影响的雾滴平均直径能够决定雾滴动能, 喷雾压力决定喷雾流量。结合图 3a 和图 3f 看, 当喷雾压力增大时, 喷雾流量增大, 同时雾化粒子直径变小, 更易受外界风速影响而飘失从而影响其受风速胁迫的程度。由于高速风幕对雾滴加速区域仅局限在喷雾区域中, 一旦自然风将雾滴风送至风幕加速区域之外, 风幕对雾滴的胁迫影响不显著。由于自然风不可控, 因而在喷雾主动控制中可以考虑将风筒进口风速、喷雾量和喷雾角作为控制变量。综合图 3 的映射关系可看出, 4 个工况参数中对飘失率影响的重要性从大到小依次为: 自然风速、风筒进口风速、药液流量和喷雾角。

2.3 基于模糊推理系统的多工况喷雾参数补偿

上述 CFD 仿真和 MRVM 建立的雾滴飘失特性模型中只考虑了影响喷雾性能的 4 个因素, 但是当作物冠层茂密程度、喷头与冠层的垂直距离不同时, 喷雾效果仍然受其参数大小的影响。因此为了达到更稳定的药液沉积效果, 需要依据作物冠层茂密程度、喷头与冠层的垂直距离对喷雾主动控制参数进行修正。

依据喷雾系统的试验分析和专家经验, 建立了

11 条模糊规则^[21], 语言变量均采用高斯形隶属度函数。输入语言变量集为: 作物茂密程度(稀疏、中等稀疏、中等、中等茂密、茂密); 喷头与冠层的垂直距离(近、中近、中、中远、远), 其真值通过用户输入定义。输出语言变量集为: 风筒风量修正系数(减小、不变、增大)、喷雾量修正系数(减小、不变、增大)和喷雾角修正系数(减小、不变、增大)。本文使用 Matlab 模糊逻辑工具箱定义上述模糊推理系统, 获得 2 输入 3 输出的映射关系, 对 3 个喷雾控制参数修正。系统响应曲面如图 4 所示。

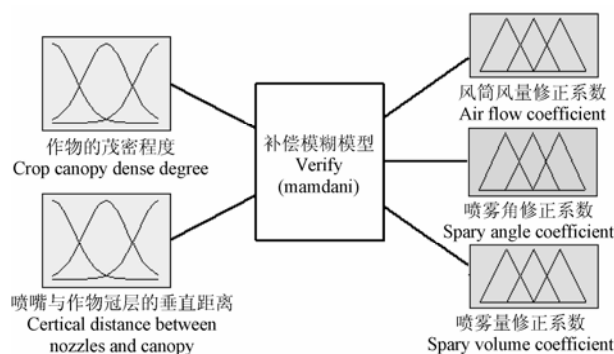
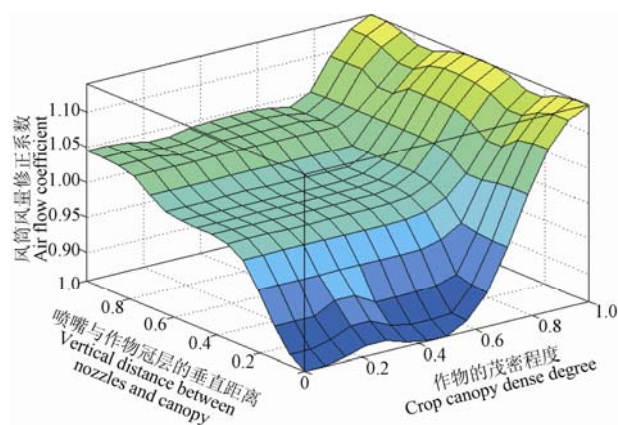


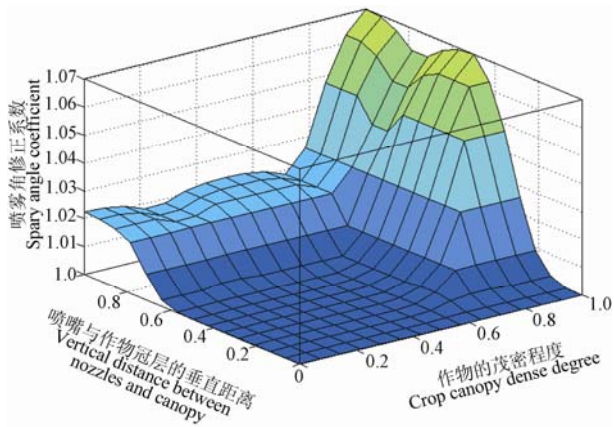
图 4 喷雾机工作参数修正模糊推理系统

Fig.4 Sprayer modified fuzzy inference system operating parameters

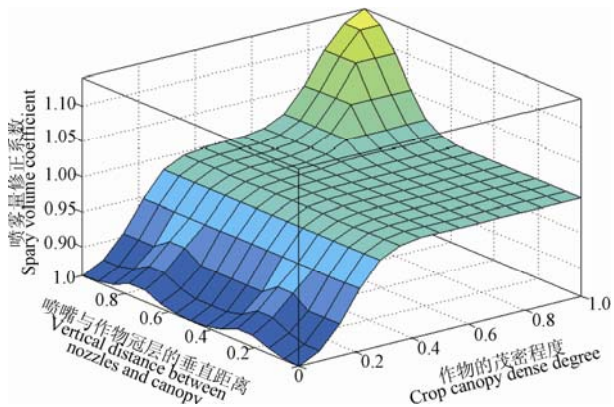


a. 风筒风量补偿的响应面

a. Response surface of air-assisted flow compensation



b. 喷雾角补偿的响应面
b. Response surface of spray angle compensation



c. 喷雾量补偿的响应面
c. Response surface of spray flow compensation

图5 作物的茂密程度和喷嘴与作物冠层的垂直距离与修正系数间的映射关系

Fig.5 Mapping relationship among dense level and vertical distance between crop nozzles to correction factor

3 试验验证

3.1 雾滴飘失验证试验

为了检验雾滴漂移特性的建模质量,对喷杆喷雾机进行了雾滴漂移试验和测试。试验采用3MQ-600型气辅式喷杆喷雾机(如图6所示),由东方红75拖拉机提供机具所需动力。在目标喷头两侧沿喷杆方向,距离喷杆下风向1.5 m处布置距离地面30、60、90和120 cm的直径为9 cm的圆型滤纸片阵列,2列滤纸片的横向间距30 cm。依据典型工况参数(见表2)进行喷雾试验。采用组合风扇送风模拟自然风,测量在喷头位置处的自然风速,使其达到所需试验工况中模拟自然风速的参数。由于喷雾角对飘失性能影响较小,故试验暂未调整喷雾角。用1 g/L的甲基紫溶液代替药液喷雾,喷药30 s后,收集滤纸片,将滤纸片单独装入自封袋中并标记位置信息。在实验室中使用酒精溶液(浓度6%)将各滤纸片上甲基紫漂洗10 s,然后采用分光光度计测定其漂洗溶液的甲基紫浓度,以此

计算甲基紫含量。重复上述试验测定3次。



图6 防飘性能试验现场
Fig.6 Anti-drift performance test

3.2 试验结果分析

依据3个典型工况参数进行的喷雾试验中,MRVM预测结果与CFD计算的分析结果(见表2)相比:飘失率的平均绝对百分比误差2.56%,建模精度满足工程要求。

飘失率预测采用模糊参数修正和MRVM模型计算获得。此处将作物茂密程度考虑为“稀疏”,喷头与冠层的垂直距离考虑为“中”。但由于实测试验条件有不可控干扰,且与CFD模型及其仿真边界条件存在偏差,加之性能评价标准稍有差别,实测和预测飘失率的绝对平均误差为8.92%,但辅助喷雾与自然风耦合导致的雾滴飘失变化趋势与CFD仿真规律相符,该误差可通过进一步调整喷雾飘失仿真模型和评价标准,使其更加符合实际测试条件。

表2 典型工况试验方案与结果

Table 2 Test results of typical working conditions							
试验号 Test No.	模拟自然风速 Wind speed (m·s ⁻¹)	喷雾压力 Spray pressure /psi	喷头高度 Nozzles height /cm	进口风速 Inlet speed (m·s ⁻¹)	CFD 飘失率 CFD drift rate/%	预测 飘失率 Predicted drift rate/%	实测 飘失率 Test drift rate/%
1	3	30	50	5	22.9	23.6	32.6
2	4	40	50	6	37.2	36.8	45.2
3	3.5	50	50	5.5	21.1	21.9	31.3

4 结论

为了建立不同工况下气辅式喷杆喷雾中的雾滴飘失模型,本文采用多相流计算流体动力学软件,建立其三维流场几何模型,依据不同工况参数对雾滴漂移特性的影响,利用均匀设计安排试验方案,完成训练样本采集,采用多元相关向量机建立了多工况喷雾雾滴飘失特性预测模型,并建立模糊推理系统对预测模型未考虑的变量进行工况参数补偿。试验验证了典型工况参数下MRVM模型以及参数补偿对减飘性能的预测有效性,结果表明:

- 1) CFD 仿真能较好的模拟出考虑自然风、喷雾流量等工况参数下的雾滴漂移规律;
- 2) 采用多元相关向量机回归模型能够更方便

的建立多输入多输出的多工况下的雾滴漂移模型, 建模精度的平均绝对百分比误差为 2.56%;

3) 加入模拟自然风扰动的样机喷雾飘失试验, 实测与预测数据的绝对平均误差为 8.92%, 其飘失规律与所建飘失模型基本吻合。

下一步研究工作将考虑雾滴粒子与作物表面的交互作用对喷雾沉积效果的影响, 以更清晰的了解多工况参数对雾滴在作物上中下层的沉积规律。为最终建立面向雾滴沉积效果的喷雾主动控制系统的提供控制模型和决策依据。

[参 考 文 献]

- [1] 刘秀娟, 周宏平, 郑加强. 农药雾滴飘移控制技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 186—190.
Liu Xiujuan, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(1): 186—190. (in Chinese with English abstract)
- [2] Derksen R C, Zhu H, Ozkan H E, et al. Determining the Influence of Spray Quality, Nozzle Type, Spray Volume, and Air-Assisted Application Strategies on Deposition of Pesticides in Soybean Canopy. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1529—1537.
- [3] 刘雪美, 苑进, 张晓辉, 等. 3MQ-600 型导流式气流辅助喷杆弥雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 8—12.
Liu Xuemei, Yuan Jin, Zhang Xiaohui, et al. Development and experiment on 3MQ-600 type air-assisted boom sprayer with air-deflector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 8—12. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吕晓兰, 傅锡敏, 宋坚利, 等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 59—63.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Song Jianli, et al. Influence of spray operating parameters on spray drift[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孙国祥, 汪小岳, 丁为民, 等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 13—19.
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition base on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 13—19. (in Chinese with English abstract)
- [6] Cooke B K, Hislop E C, Herrington P J, et al. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance[J]. Crop Protection, 1990, 9(4): 303—311.
- [7] Bukovac M J, Cooper J A, Whitmoyer R E, et al. Spray application plays a determining role in performance of systemic compounds applied to the foliage of fruit plants[J]. Acta Hort, 2002, 594: 65—75.
- [8] Hislop E C, Western N M, Cooke B K, et al. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions[J]. Crop Protection, 1993, 12(3): 193—200.
- [9] Howard K D, Mulrooney J E, Gaultney L D. 1994. Penetration and deposition of air-assisted sprayers[J]. ASAE Paper No. 941024. St. Joseph, MI.
- [10] Rocamora M C, Val L, Perez M. Modelling the performance of air-assisted spraying on artichoke[J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(4): 385—393.
- [11] 张铁, 杨学军, 严荷荣, 等. 超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 77—86.
Zhang Tie, Yang Xuejun, Yan Herong, et al. Anti-drift technology of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 77—86. (in Chinese with English abstract)
- [12] Baetens K, Nuyttens D, et al. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 161—173.
- [13] Nuyttens D, De Schampheleire, Baetens K, et al. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: Results of a 5 year study[J]. Transactions of the ASABE, 2011, Paper No. 1009017.
- [14] 刘雪美, 张晓辉, 刘丰乐, 等. 喷杆喷雾机风助风筒流场分析及其结构优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 80—85.
Liu Xuemei, Zhang Xiaohui, Liu Fengle, et al. Air flow simulation and flow field optimization for air duct of air-assisted boom sprayer[J]. Transactions of CSAM, 2011, 42(4): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [15] Endalew A M, Debaer C, Rutten, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying—part I: Model development and effect of wind speed and direction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 128—136.
- [16] Endalew A M, Debaer C, Rutten, 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(2): 137—147.
- [17] 刘雪美, 苑进, 张晓辉, 等. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, S1: 67—72.
Liu Xuemei, Yuan Jin, Zhang Xiaohui, et al. Effect of air-assisted spraying condition parameters on boom spray

- drift characteristic[J]. Transactions of CSAM, 2012, S1: 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 113—142.
- [19] Thayananthan A, Navaratnam R, Stenger B, et al, Multivariate Relevance Vector Machines for Tracking. ECCV2006, Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3953:124—138.
- [20] Fang, K. and Wang, Y. Number-theoretic Methods in Statistics[M]. Chapman and Hall Press, 1994.
- [21] 刘雪美. 喷杆喷雾机风助风筒多目标优化设计[D]. 山东农业大学, 2010.
- Liu Xuemei, Multi-objective optimization design for air duct of air-assisted boom sprayer[D]. Shandong Agriculture University, 2010. (in Chinese with English abstract)

Modeling and compensation for characteristic of droplet drift on air-assisted boom spraying accounting for wind speeds

Yuan Jin^{1,2}, Liu Xuemei^{1,2*}, Zhang Xiaohui^{1,2}, Zuo Wenlong¹, Wang Xiu³, Chen Liping³

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Tai'an 271018, China;

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

Abstract: Air-assisted boom spraying has proven to have a positive effect on drift reduction. However, its effects with certain operational parameters of air-assisted boom sprayers are varied depending on natural wind speeds, outlet velocities of air curtain, spraying flow, spraying angle and etc, thus the spray drift rate and deposition rate are not stable in the field working. For example, if wind speed is low, and airflow and outlet speed of wind duct are high, which not only increases the power consumption of the fan, but also directly blew the droplets to ground and formed serious spray loss. On the contrary, when the wind speed is high, the speed of air-assisted flow is not enough to overcome the influence of wind, the spray droplets is drifted. To provide the control parameters to achieve precise control model with pesticide effect, this paper, leveraged by a three-dimensional multiphase flow computational fluid dynamics (CFD) model with the consideration of wind speeds, inlet speed of air curtain, spraying flow and spraying angle, simulates the coupling interaction of natural wind (continuous phase), the air curtain (continuous phase) and the droplets (discrete phase) of the air-assisted boom sprayer to study the droplet drift characteristics. The uniform experimental design took into the four factors with five levels of L2- deviation of the uniform design table U25 being applied to arrange the simulation scheme. Two criteria, the drift rate and the downward velocity under the duct 0.5m, were used to evaluate the spraying performance under the computing utilizing CFD simulation results. The simulation results were collected as training samples, and the multivariate relevance vector machine (MRVM) regression method was utilized to establish the 4-inputs-2-outputs spraying drift model accounting for the varying natural wind. The CFD simulation and the MRVM model only considered the four factors which influenced the spraying effect, however the vertical distance when the dense degree, crop of nozzle and the crop canopy were not at the same time, influence of spray effect was also affected by these parameters. Therefore, a fuzzy inference system model considering crop canopy dense degree and vertical distance between nozzles and canopy was established to correct the 3 control parameters. According to the experiment, spray system analysis and expert experience, 11 fuzzy rules with Gauss membership function were set up. By using the fuzzy logic toolbox, fuzzy inference system was defined to obtain the mapping between input and output. In order to quantitative analysis the modeling quality of the droplet drift characteristics, the 3MQ - 600 type air-assisted boom sprayer was used in the droplet drift test. Model tests showed that the mean absolute percentage error of the drift rate was 2.56%, and the spraying drift test of air-assisted boom sprayer prototype with natural wind disturbance had validated that the measured and predicted drift loss rate average error of 8.92%, which still showed the same interaction rule with the built spraying drift predictive model. This study provided the active control system with spraying anti-drift and droplet deposition effects-oriented control and decision-making model.

Key words: spraying, flow fields, models, anti-drift, multiple working conditions, air assisted boom sprayer

(责任编辑: 鲍洪杰)