基于 CFD 的棉花吊喷施药喷头排布优化仿真与验证

王锦轩,胡敏英,桑永英,徐 宁,陈春皓,刘 超

(河北农业大学 机电工程学院,河北 保定 071001)

摘 要: 针对棉花中后期因冠层郁闭导致施药效果差的问题,对 76 cm 等间距种植的机采棉进行数据采集并建 立模型,以高地隙吊杆式喷雾机为载体,采用 CFD 离散相模型对锥形雾化喷头的喷洒效果进行仿真模拟。以最 低喷头离地高度、喷头间距及 α 角度为试验因素,以雾滴在棉花叶片正、反面的覆盖率作为评价指标,设计响应 面试验,研究喷头布置参数对喷雾效果的影响。结果表明:当最低喷头离地高度为 400mm、喷头间距为 300mm、 α 角为 30°时,雾滴在叶片正、反面覆盖率平均预测值分别为 20.283%和 11.042%。利用实际棉花模型对仿真结 果进行验证试验,雾滴在棉株叶片正、反面的平均覆盖率分别为 21.79%和 11.97%,正、反面覆盖率相对误差最 大分别为 8.02%和 9.40%。试验结果表明:模型可靠,优化结果可改善中、下层叶片受药情况,棉株整体受药良 好。

关键词:棉花;施药机具;响应面试验;优化;CFD
 中图分类号:S491;S220.3
 文献标识码:A
 DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2024.06.008

0 引言

棉花不仅有重要的经济价值,而且还是重要的战略物资。因其具有生长周期长的特点,导致棉花生长过程中面临诸多病虫害的威胁。我国棉花多采用密 植模式,种植密度可达欧美等国家的两倍以上,这就 造成棉花在生长的中后期枝叶繁茂,茎叶交叉重叠, 常规的顶喷式喷杆喷雾机喷洒的药液难以深入到棉 花中下部叶片,导致病虫害防治效果不佳、脱叶剂需 要重复喷洒及延长采收周期等问题^[1]。

吊喷式喷雾机可在一定程度上解决上述问题,但 不同植物对吊杆喷头上喷头的布置需求不同。张弼 铖^[2]等所在的新疆兵团改进了3WP(X)-2000-18型 吊杆式喷杆喷雾机,提高了对棉株中、下层的喷施效 果。秦维彩^[3]等对喷雾机横杆与吊杆喷头参数进行 了研究与优化,提高了脱叶剂在棉花叶片上的覆盖 率。目前,针对新疆矮化密植(66+10 cm)模式的棉花 研究较多,但缺乏对 76 cm 等间距棉花植株喷雾参数 的研究,且大多通过田间试验进行,所需试验量大,受 季节限制较多,还可能会对棉花植株造成破坏。孙国 祥^[4]等基于计算流体力学(CFD)软件采用离散相模

基金项目:河北省引进留学人员项目(C20210366)

文章编号: 1003-188X(2024)06-0009-010

型对粒子进行追踪,研究了不同条件下的雾滴沉积特性,降低了自然环境条件下试验中的不可控因素。左 文龙^[5]通过构建叶片模型观察雾滴在不同情况下在 模拟叶片上的附着情况。国外学者 Tsay^[6]采用 Fluent 软件对风送式喷雾机的防飘效果进行了模拟。 Baetens^[7]等利用三维稳态模型研究了在不同条件下 雾滴沉积的效果。综上,利用计算机对植保机械的雾 滴沉积仿真试验同样可作为重要的研究手段。

本文通过建立三维棉花植株模型,利用 CFD 软件 模拟雾化喷头的喷洒效果,研究雾滴在棉花叶片上的 附着情况,旨在优化吊杆上喷头的安装参数,提高雾 滴对棉花叶片正、反面的覆盖率及整体覆盖率,为吊 喷喷头的布置提供参考。

1 棉花模型的建立

以河北省保定市竞秀区颉庄乡的一处棉田为对 象,采用76cm等间距种植,于8月初对影响棉花叶片 分布的几个主要参数进行数据采集。棉花结构如图1 所示。建模所需主要参数有棉花高度(H)、最低分枝 距地面高度(h)、分枝个数,分枝平均长度、顶叶个数、 侧叶个数、叶茎平均长度(l)、叶片面积。

对不同高度、不同部位、长势较好且相对完整的 棉花叶片进行采集、压平处理,再将叶片扫描导入到 ImageJ软件中,进行去除叶茎、区域选择、调节像素、 阈值调节后,得到所占比例求出叶片面积,如图2所 示。测得棉花各个参数的数据如表1所示。根据表1

收稿日期: 2022-06-06

作者简介: 王锦轩(1996-),男,河北保定人,硕士研究生,(E-mail) 473553548@qq.com。

通讯作者:胡敏英(1980-),女,石家庄人,副教授,硕士生导师,(Email)hmy319@163.com。

中数据,利用 SolidWorks 软件对棉花植株进行建模,如 图3所示。



图1 棉花结构简图

Fig.1 Structure diagram of cotton

(a) 扫描





图 2 计算叶片面积 Fig.2 Calculate blades area

表日	棉花参数	
Table 1	Cotton parameters	

试验 序号	棉花高度 /mm	分枝个数 /枝	分枝平均长度 /mm	顶叶个数 /片	侧叶个数 /片	叶茎平均长度 /mm	最低分枝距地面高度 /mm	叶片面积 /cm ²
1	900.6	8	535.2	2	3	116	214	900.6
2	1156.4	11	606.2	3	5	172	275	1156.4
3	1142.6	9	598.4	2	4	154	232	1142.6
4	1121.3	8	582.8	2	3	126	242	1121.3
5	974.8	8	573.6	3	2	105	215	974.8
6	847.1	6	508.7	2	3	98	176	847.1
7	858.3	7	516.6	2	3	101	188	858.3
8	957.6	8	534.1	2	3	115	196	957.6
9	1005.7	8	585.8	3	3	143	218	1005.7
10	1105.4	9	602.5	2	4	138	235	1105.4
11	995.6	10	578.3	3	2	125	200	995.6
12	1025.3	9	572.5	2	3	167	235	1025.3
13	1056.8	8	580.8	3	4	155	243	1056.8
14	1100.9	9	599.2	2	4	148	266	1100.9
15	934.2	7	534.5	2	3	123	224	934.2
16	957.5	8	547.4	2	3	131	213	957.5
17	884.4	6	514.3	2	3	108	195	884.4
18	1116.3	10	603.7	2	5	141	253	1116.3
19	925.7	8	527.6	3	3	116	206	925.7
20	1035.4	9	588.9	2	3	127	224	1035.4
平均值	1005.1	8.3	564.56	2.3	3.3	130.45	222.5	1005.1



图 3 三维棉花植株模型

Fig.3 Three-dimensional model of cotton

2 模型简化及流体计算模型建立

2.1 模型简化

吊喷作业方式如图 4(a) 所示。工作时,刚性吊杆 上安装若干组喷头,向两侧的棉花叶片进行喷施作 业,最低喷头离地高度为 *d*,喷头间距为 *m*,喷头中心 线与水平方向的夹角为 α,如图 4(c)所示。图 4(b) 中阴影部分表示喷雾覆盖面积。由于单侧喷头喷雾 并不会覆盖整株植株,为了节省计算量,提高计算精 度,将棉花模型分为4 个区域,如图 4(c)所示,每次只 对1 个区域的叶片做喷雾仿真。



图 4 喷雾机作业示意图 Fig.4 Operation diagram of sprayer

仿真计算中喷头处于静止状态,为了使雾滴最大 面积地覆盖单株叶片,经过计算,区域1、2的喷头置 于竖直距植株380 mm的水平中间位置;区域3、4的 喷头与1、2 区域的喷头水平共线相距800mm,如图4 (d)所示。图4(d)中,黑色三角部分代表处于不同区 域时喷头喷施的方向与位置,省略掉植株的主干、分 枝以及叶茎等部分,只留下模拟区域的叶片进行仿真 计算,实现对棉株模型的简化。

在 SolidWorks 中建立一个 1500 mm×1500 mm× 1500 mm 的正方体作为流体域,将叶片包裹在其中, 导入到 Meshing 中进行网格划分,网格总数为 832 419 个,如图 5 所示。将正方体左侧面设置为速度进口 Inlet,右侧面为压力出口 Outlet,其余都设置为 Wall 壁 面,计算区域内部为空气。



图 5 流体域网格划分 Fig.5 Fluid domain meshing

2.2 流体计算模型

2.2.1 喷头模型选择

所选地区棉花为 76cm 等间距种植,棉花平均高 度在1 m 左右,喷头置于植株之间,常规密植,此时锥 形喷头的喷施效果要优于扇形喷头^[8]。验证试验时 使用的雾化喷头如图 6 所示。其喷头作业半径为 550mm 左右,调用 Fluent 中的压力旋流喷头(pressure -swirl-atomizer)来模拟锥形雾化喷头的喷施效果^[9]。





2.2.2 计算模型选择

根据雾化喷头喷雾特征,采用 Launder 和 Spalding 提出的标准湍流模型进行仿真计算^[10-11],其运输方程 式为

动能方程(k方程)为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$
(1)
耗散方程(ε 方程)为

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(p\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$
(2)

其中, ρ 为连续相密度(kg/m³); ε 为湍动耗散率 (m²/s³); k 为湍动能(m²/s²); μ 为连续相动力粘度 (Pa · s); μ_i 为湍流粘度(Pa · s); σ_k 为湍动能普朗特 数; σ_s 为湍动耗散率普朗特数;t 为时间(s); u_i 为第 i 个 方向上的速度(m/s); G_k 为由平均速度梯度引起的湍 动能产生项(Pa/s); G_b 为由浮力影响引起的湍动能产 生项(Pa/s); Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的 影响(Pa/s); S_k 为自定义项(Pa/s); S_s 为自定义项(Pa/ s²); C_{1s} 、 C_{2s} 、 C_{3s} 为经验常数,分别为 1.44、1.92、0. 09^[4]。

将雾滴作为离散相进行仿真计算,在离散相模型 下,不考虑颗粒体积的影响及颗粒之间的作用力,只考 虑流体对颗粒的作用力,将液滴视为刚性的球形。假 设雾滴在运动过程中不发生形变,不考虑液滴颗粒的 转动,且液滴不会对空气流场产生影响^[12],不发生热 交换,内部能量不变,液体的势能变化忽略不计,根据 牛顿第二定律,可将液滴运动模型简化为^[13]

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = F_D + F_A + F_B + W \tag{3}$$

其中,*m* 为液滴质量(kg);*v* 为液滴运动速度(m/s); F_{D} 为曳力(N); F_{A} 为附加质量力(N); F_{B} 为浮力(N);W为重力(N)。

根据欧拉法--拉格朗日方法,求解出的离散相颗粒运动方程为^[10-11]

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t} = \frac{18\mu C_p Re}{24\rho_p d_p^2} (u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (u - u_p)$$
(4)

其中,u为连续相速度(m/s); u_p 为颗粒速度(m/s); ρ_p 为颗粒密度(kg/m^3); d_p 为颗粒直径(m);Re为相 对雷诺数; g_s 为重力加速度(m/s^2)。

模拟喷嘴喷雾时考虑雾滴的碰撞和聚合,根据 Rourke 得出的临界值^[14]判断雾滴的合并和反弹,其计 算公式为

$$b_{\rm crit} = (r_1 + r_2) \sqrt{\min(1.0, \frac{2.4f}{We})}$$
 (5)

其中, b_{erit} 即为判断雾滴碰撞合并或反弹的临界值 (m); r_1 、 r_2 为小液滴半径(m);f为 r_1 、 r_2 的函数;We为 碰撞韦伯数。

2.2.3 模拟参数设置

1)离散相喷射源参数:离散相材料为水,粒子流数为200,雾滴流量为0.006kg/s;喷射开始时间为0, 结束时间为5s;喷射孔径为0.02m;喷孔半锥角为 30°;喷孔上游压力为120kPa;起始方位角为0,终止 方位角为360°;液膜常数为12;索带常数为0.5;喷雾 扩散角为6°;开启离散随机游走模型,时间尺度常数 为0.05s;开启离散相模型中的破碎模型,选用Taylor 比拟破碎模型^[15]。

2)边界条件参数:由于壁面不作为研究对象,模 拟环境为无风,因此入口、出口以及四周壁面全部设 置为"escape"逃逸,棉花叶片各表面全部设置为 "trap"捕捉。

3)模拟参数:采用瞬态模拟,考虑重力作用。时间步长0.01s,最大迭代数为20,时间步数为200,模拟时长2s。

仿真优化与结果 3

喷头布置参数 3.1

为监测棉花植株各部分的雾滴覆盖情况,根据株 高和叶片分布将棉花植株分为3层:距离地面200~ 500mm 为下层,距离地面 500~800mm 为中层,距离地 面 800~1100mm 为上层。由于棉花植株较高,单一喷 头难以覆盖整株棉花,因此需要对影响雾滴覆盖率的 喷头布置参数进行分析。

1) 喷头数量。喷头数量直接影响雾滴的覆盖情 况及工作效率,过高的喷头数量会造成药液的浪费且 增加污染。为了科学使用药液,避免过高的喷洒重复 率,需要确定喷头的数量。计算公式为^[16]

 $n = \frac{L_0 - Db_0}{D - Db_0}$

(6)

图 7 仿真结果图 Fig.7 Simulation result diagram





Fig.8 Influence of ground clearance of nozzle on droplet coverage 雾滴沉积状态反应在雾滴覆盖率和雾滴分布均匀 性上^[17-18],利用 ImageJ 软件分析叶片上雾滴面积求得 雾滴覆盖率,计算公式为

$$\delta = \frac{S_{\tilde{g}\tilde{g}\tilde{g}\tilde{g}\tilde{h}}}{S_{\dot{\omega}}} \times 100\% \tag{7}$$

(a)

其中,δ为覆盖率(%);S_{雾滴附着}为附着在叶片上的 雾滴面积 (mm^2) ; S_{\pm} 为仿真区域叶片总面积 (mm^2) 。

由图 8 可知:喷头在 200 mm 高度时附着率为0,在 1200mm 左右时达到最高;之后开始骤降,最低喷头应

其中,n为喷头数量;D为单个喷头的喷洒作业直 径(mm); b_0 为相邻喷头的喷洒重复率; L_0 为总的喷洒 作业幅宽(mm)。

根据实际情况,期望喷头喷洒重复率大于35%且 小于 50%。单个喷头喷洒直径为 550mm,作业幅宽为 1100mm,带入上式后取整,确定喷头使用数量为3个。

2) 喷头高度。喷头的高度影响不同层叶片的受 药率,以单个喷头进行喷洒观察喷头高度对覆盖率的 影响。从离地高度 200mm 开始,每隔 100 mm 进行 1 次喷洒模拟,到1500 mm 结束,分别在4个区域进行 仿真模拟,计算不同高度下雾滴在叶片正、反面的平 均覆盖率。仿真效果如图7所示,高度对叶片正、反 面覆盖率的影响如图 8 所示。

处于棉花下层,即 200~500mm 之间,提高了药液在下 层叶片上的附着。因此,将喷头高度区间确定在 300~ 1200mm 之间。

(b)

3)α角度。α角直接影响锥形喷头的作业面积,将 3 个喷头分别布置在 300、700、1100mm 处.α 角从 0°开 始每隔10°进行1次喷施试验,到90°结束,分别在4个 区域进行仿真模拟,观察不同角度下雾滴在叶片正、反 面的平均覆盖率,得到数据如图9所示。



由图 9 可以看出:雾滴在叶片正、反面覆盖率整体 先上升后下降,在 30°左右时达到峰值。

3.2 响应面试验

3.2.1 试验因素

1)最低喷头离地高度:直接影响雾滴在下层棉花 叶片的附着情况,同时决定了喷头的间距。最低喷头 应布置于下层,根据已确定的喷头高度区间,取最低 喷头离地高度为 300 mm、400 mm 和 500 mm 进行优 化实验研究。

2)喷头间距:喷头间的距离影响了雾滴分布的均 匀度与可覆盖的范围。由图 8 数据可知,为了使 3 个 喷头位置都处于最优区间,根据最低喷头离地高度, 取喷头间距为 250、300、350mm。

3)α角:图9显示α角在30°时达到峰值,因此α 角度取20°、30°、40°。

3.2.2 试验设计与分析

根据以上试验因素,以区域 1 为例,以雾滴在棉 花植株叶片上的正面覆盖率 R_1 、反面覆盖率 R_2 为响 应值,试验因素水平的编码表如表 2 所示。利用 Design-Expert8.0.6 的 Box-Behnken 设计分析试验,试验 方案与仿真结果如表 3 所示,雾滴覆盖率回归方程方 差分析分析结果如表 4 所示。

表 2 试验因素水平编码表

	Table 2	Factor coding	
		试验因素	
试验 水平	最低喷头离地高度 A	喷头间距 B /mm	α角C /(°)
-1	300	250	20
0	400	300	30
1	500	350	40
	主2 景运要关	<u>-</u>	Ħ

	衣 5	务间復	 血	山短人	リネ	、 勺 珀 禾	÷
Table 3	Test	scheme	and	results	of	droplet	coverage

试验	ì	试验因素	ž.	正面覆盖率 R_1	反面覆盖率 R_2	
序号	А	В	С	/%	/%	
1	-1	-1	0	18.052	9.703	
2	1	-1	0	20.310	8.985	
3	-1	1	0	19.583	10.907	
4	1	1	0	21.190	7.976	
5	-1	0	-1	16.076	8.641	

			纷	转表 3		
试验	试验因素			正面覆盖率 R_1	反面覆盖率 R ₂	
序号	译号 A B C	/%	/%			
6	1	0	-1	17.581	6.834	
7	-1	0	1	13.004	7.534	
8	1	0	1	15.830	5.385	
9	0	-1	-1	15.036	7.833	
10	0	1	-1	15.585	8.189	
11	0	-1	1	12.103	6.685	
12	0	1	1	14.628	6.910	
13	0	0	0	20.400	10.671	
14	0	0	0	20.273	10.820	
15	0	0	0	20.482	10.750	
16	0	0	0	20.317	10.642	
17	0	0	0	20.587	10.516	

表 4 雾滴覆盖率回归方程方差分析分析结果

Table 4 Analysis results of variance of regression equation of

droplet coverage

试验	正面覆言	盖率 R ₁ /%	反面覆盖率 R ₂ /%			
指标	<i>F</i> 值	<i>p</i> 值	<i>F</i> 值	<i>p</i> 值		
模型	426.46	< 0.0001 * *	456.16	< 0.0001 * *		
А	230.58	< 0.0001 * *	592.54	< 0.0001 * *		
В	103.27	< 0.0001 * *	6.17	0.0420*		
С	260.58	< 0.0001 * *	254.39	< 0.0001 * *		
AB	2.91	0.1318	100.35	< 0.0001 * *		
AC	11.98	0.0105 *	2.40	0.1655		
BC	26.80	0.0013 * *	0.35	0.5718		
A2	12.47	0.0096 * *	218.88	< 0.0001 * *		
B2	105.76	< 0.0001 * *	83.08	< 0.0001 * *		
C2	3027.86	< 0.0001 * *	2676.47	< 0.0001 * *		
失拟项	3.98	0.1078	0.82	0.5474		

注:*显著(p<0.05),*极显著(p<0.01)。

由表4数据可知:正面覆盖率R₁的失拟项p值为 0.1078,模型显著性校验p<0.0001,模型极显著,失拟 $R_1 = 20.41 + 1.02A + 0.69B - 1.09C - 0.16AB + 0.33AC + 0.49BC + 0.33A^2 - 0.96B^2 - 5.12C^2$

反面覆盖率 R_2 的失拟项 p 值为 0.5474,模型显著 性校验 p < 0.0001,模型极显著,失拟项不显著;拟合统 计 $R^2 = 0.9983$,模型拟合程度高。其中, A^2 、 B^2 、 C^2 、A、 C、AB 极显著, B 显著,影响显著顺序为 A^2 、 C^2 、A、C、 AB、 B^2 、B。最低喷头离地高度 A 与喷头间距 B 交互

 $R_2 = 10.68 - 0.95A + 0.097B - 0.62C -$

$$0.55AB - 0.086AC - 0.033BC$$
 -

 $0.80A^2 - 0.49B^2 - 2.78C^2$

图 10 为试验因素交互作用对棉花叶片反面雾滴 覆盖率影响。由图 10 可知:喷头距离地面越高,雾滴 覆盖率提高;角度的选择关系到叶片的分布,对覆盖 率影响较大;随着喷头间距的增大,覆盖率呈现先升 高后下降的趋势。

图 11 为试验因素交互作用对棉花叶片反面雾滴 覆盖率影响。由图 11 可知:雾滴覆盖率随喷头离地 距离的升高而降低;α 角对叶片反面覆盖率的影响与 对正面的影响趋势基本一致;喷头间距在较小时可获 得较高的覆盖率。



图 10 交互因素对叶片正面覆盖率的响应面

Fig.10 Response surface of interaction factors to coverage of blades front



图 11 交互因素对叶片反面覆盖率的响应面

Fig.11 Response surface of interaction factors to coverage of blades back

通过 Design-Expert8.0.6 软件对模型进行预测,得 出喷头布置参数的最优组合为 A=0、B=0、C=0,即当 最低喷头离地高度为 400 mm、喷头间距为 300mm、α 角为 30°时,正、反面雾滴覆盖率预测值分别为20.233% 和 11.032%。

3.2.3 结果验证

其它 3 个区域以相同的方式进行仿真计算,每个 区域的结果如表 5 所示。所得最优组合均为 A=0、B= 0、C=0,且预测覆盖率相对误差不超过 1%。

表5 各区域仿真结果对比

Table 5	Comparison of simulation resu	lts in each region	%
区域	正面覆盖率/%	反面覆盖率/%	
1	20.233	11.032	_
2	20.367	11.015	
3	20.429	10.982	
4	20.101	11.137	
平均值	20.283	11.042	

验证试验 4

4.1 材料与方法

田间试验中的自然环境条件难以控制,且重复试

验会对棉花造成损伤或变形,影响喷雾试验的准确 性;若将棉花移植到试验环境中会使得棉株迅速脱水 萎蔫,且在此过程中难以避免地会对棉花植株造成损 伤^[19]。因此,参考其他文献以及国外搭建仿真模型植 株的成功经验,通过对棉田中的棉花进行实际测量制 作仿真棉花植株模型。所制作的棉花叶片为塑料材 质,且经过防水处理,可重复进行试验,不易损坏变 形,模型高约1.1m,分枝8枝,每枝有5片叶片,最底 枝距地面高度约 220mm, 如图 12 所示。试验环境为 室内,模拟无风环境,将锥形雾化喷头与水泵连接,将 加入显色剂的水作为喷雾试剂,用软管将复数喷头连 接并将喷头固定在型材上作为喷雾装置。



图 12 验证试验 Fig.12 Verification test

按照仿真试验中得出的最优组合布置喷头,将棉 花模型划分为4个区域分别进行试验,在不同区域试 验时,将该区域的叶片正、反面贴均上水敏纸,每次设 定好参数后将喷雾装置开启 2s 后停止喷洒;待水敏纸 晾干后采集并做标记,进行数据分析;每个区域试验 重复3次,以降低误差。

4.2 数据处理

将晾干的水敏纸压平处理后,扫描上传至计算 机,利用 ImageJ 软件读取水敏纸图像,经过区域选取、 像素调节、阈值调节等步骤后计算出雾滴覆盖率,如 图 13 所示。其计算公式为^[20]

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{N} f(i,j)}{MN} \times 100\%$$

其中,M 为水敏纸分析区域的宽度(像素);N 为 水敏纸分析区域的高度(像素);f(i,j)为图像分析区 域中(i, j)处像素的灰度值标志,若为黑色,则f(i, j)j)=1,否则f(i, j)=0。





4.3 试验结果分析

试验结果如表6所示。由表6可知:该喷头排布 可显著提升棉株中层叶片的正、反面覆盖率,棉桃与 叶片大部分集中于此位置,下层叶片覆盖率占比也可 达到 20% 左右, 很大程度地改善了"喷不透"的问题: 与仿真平均预测值相比,正面覆盖率相对误差最大为 8.02%,反面雾滴覆盖率相对误差最大为9.40%,相对 误差均在10%以内,且雾滴可以覆盖到棉株85%以上 的叶片,证明仿真试验模型数据可靠,优化结果满足 预期要求。

Table 6 Verification test results									
		正面覆	盖率/%		反面覆盖率/%				
区域	平均	上层 占比	中层 占比	下层 占比		平均	上层 占比	中层 占比	下层 占比
1	21.84	34.36	40.22	25.42		12.08	31.97	49.71	18.32
2	21.71	33.69	43.25	23.06		11.86	29.87	49.90	20.23
3	21.68	33.10	42.75	24.15		11.92	30.45	48.48	21.07
4	21.91	35.57	41.62	22.81		12.02	30.32	50.33	19.35
平均	21.79	34.18	41.96	23.86		11.97	30.65	49.61	19.74

表6 验证试验结果

5 结论

 1)通过对棉花植株关键参数实地测量,建立了棉 花植株的三维模型,分析了喷头布置参数对雾滴在叶 片上附着率的影响,确定了最低喷头离地高度、喷头 间隔及α角度的参数范围。

2)采用 CFD 离散相模型模拟锥形雾化喷头,设计 了以最低喷头离地高度、喷头间隔及 α 角度为试验因 素,以雾滴在叶片正、反面覆盖率为响应值的 3 因素 3 水平响应面试验,得到最优解,即当最低喷头离地高 度为 400mm、喷头间隔为 300mm、α 角度为 30°时,雾 滴在叶片正、反面平均附着率分别为 20.283% 和 11.042%,不同区域进行的模拟结果相对误差最大不 超过 1%。

3)利用实际棉株模型设计试验,对仿真结果进行 了验证,结果表明:雾滴在棉株叶片正、反面的平均覆 盖率为21.79%和11.97%,正面覆盖率相对误差最大 为8.02%,反面覆盖率相对误差最大为9.40%,误差均 小于10%,模型可靠;在优化排布参数下布置的雾化 喷头可大大改善雾滴在棉株中层叶片上的沉积,正、 反面覆盖率占比均可达到40%以上,下层叶片的正、 反面覆盖率占比均在20%左右。雾滴可覆盖85%以 上的叶片,棉株整体受药率良好,达到预期效果。

参考文献:

- [1] 刘雪美,刘兴华,崔慧媛,等.作物冠层雾滴沉积研究进展
 与展望[J].农业机械学报,2021,52(11):1-20.
- [2] 张弼铖,乔宁波.3WP(X)-2000-18 吊杆式喷杆喷雾机的 研制 [J].新疆农机化,2018(2):21-22,35.
- [3] 秦维彩,薛新宇,崔龙飞,等.棉花脱叶剂施药机喷雾参数 优化与试验[J].中国农机化学报,2017,38(4):25-32.

- [4] 孙国祥,汪小旵,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.
- [5] 左文龙.气流辅助式喷杆喷雾机多工况优化及试验研究 [D].泰安:山东农业大学,2015.
- [6] TSAY J, FOX R D, OZKAN H E, et al. Evaluation of a pneumatic shield spraying system by CFD simulation [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):47-54.
- [7] BAETENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, 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.
- [8] 张超,林育.机采棉施药机械化技术田间试验效果 [J].农 机科技推广,2016(2):49+51.
- [9] SEOKSU M, ESSAM A S, CHOONGSIK B. Air flow and pressure inside a pressure-swirl spray and their effects on spray development [J]. Experimental thermal and fluid science, 2009, 33(2):222-231.
- [10] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用 [M].北京:清华大学出版社,2004.
- [11] 于勇.Fluent 入门与进阶教程 [M].北京:北京理工大学 出版社,2008.
- [12] 周晴晴,薛新宇,杨风波,等.离心喷嘴雾滴运动轨迹与沉积分布特性[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38
 (1):18-23.
- [13] MOHEBI M M, EVANS J R G. The trajectory of ink-jet droplets:modelling and experiment [J]. Chemical engineering science, 2005, 60(13):3469-3476.
- [14] WANG J, LIU C, WU Y. Numerical simulation of spray atomization in supersonic flows [J]. Modern physics letters B,2010,24(13):1299-1302.
- [15] BECK J C, WATKINS A P. The droplet number moments approach to spray modelling: the development of heat and mass transfer sub-models [J]. International journal of heat and fluid flow, 2003, 24(2):242-259.
- [16] 卜燕萍, 焦键. 基于 ANSYS 的农药喷雾装置设计与模态 分析 [J]. 农机化研究, 2021, 43(2):163-168, 173.
- [17] 金永奎,薛新宇,秦维彩,等.电动单旋翼植保无人机性能 试验 [J].中国农机化学报,2019,40(3):56-61.
- [18] 丁素明,薛新宇,张玲,等.自走式果园风送喷雾机的研制 [J].中国农机化学报,2016,37(4):54-58,62.
- [18] 王善平.基于生长期识别与路径规划的喷杆喷雾机精准 施药决策系统研制 [D].泰安:山东农业大学,2021.
- [20] 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].农业机械学报,2016,47 (5):62-69.

Simulation and Verification of Arrangement Optimization on Cotton Suspender Sprayer Nozzles Based on CFD

Wang Jinxuan, Hu Minying, Sang Yongying, Xu Ning, Chen Chunhao, Liu Chao

(College of Mechanical and Electrical Enginnering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China) **Abstract**: In order to solve the problem that the spraying effeciency is low due to canopy closure of cotton in the middle and later grow stages. The data of machanical harvest cotton whit 76 cm equal spacing was collected, and the model of cotton was established. Taking high clearance suspender sprayer as the carrier, the spraying effect of conical atomizer was simulated by CFD discrete phase model. To research the influence of nozzles arrangement, a response surface test was designed. Taking the ground clearance of lowest nozzle, distance between nozzles and α angle as experiment factors; and the coverage rate of droplets on the front and back of cotton blades was used as evaluation indexes. The optimized results is the ground clearance of lowest nozzle is 400 mm, the distance between nozzles is 300 mm, and the α angle is 30°. At this time, the average predicted values of droplets coverage on the front and back of the blades are 20.283% and 11. 042%. Using the actual cotton model to verify the simulation results, the average coverage of droplets on the front and back of cotton blades are 21.79% and 11.97%, and the maximum relative error is 8.02% and 9.40%, respectively. The experiment results show that the model is reliable. And the optimized arrangement of nozzles can improve the droplets deposition on the middle and lower blades, the whole cotton plant is well coveraged by droplets as well. **Key words**; cotton; apply medicine machines tools; response surface test; optimization; CFD

(上接第8页)

Abstract ID:1003-188X(2024)06-0001-EA

Modeling and Control of Quadrotor UAV for Plant Protection Under Wind Disturbance

Lv Yulong, Shi Yongkang, Jing Qiang, Guo Wenmin, Tang Tianyao

(College of Mechanical Engineering, XinJiang University, Ür ümqi 830000, China)

Abstract: Due to the low flying altitude of plant protection drone, they are easily affected by the environmental wind field in actual flight. According to the Newton-Euler equation, the dynamic model of the quadrotor aircraft in the wind environment is established, and the controller based on the inner and outer loop PID control strategy is designed. Among them, the attitude angle controller adopts a quaternion-based feedback controller, and the Lyapunov stability criterion is used to verify its global asymptotic stability; the attitude angle rate controller adopts a PID controller; the position controller adopts a velocity PID controller and position P controller. Through the wind field simulation experiment and actual flight experiment in Gazebo, the parameters of the designed quadrotor aircraft control system are debugged and verified, and the control performance of the designed quadrotor aircraft control system under the action of natural wind field is proved. The results show that the designed controller has the ability to control the stable flight of the quadrotor in the wind field environment.

Key words: UAV for plant protection; quadrotor; wind field; quaternion; global staility; PID