

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.015

超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究^{*}

张 铁 杨学军 严荷荣 王 俊 董 祥

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 结合超高地隙喷雾机实际结构,应用 ANSYS Fluent 软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、离散相模型与 Couple 算法,建立了超高地隙喷杆喷雾机风幕式气流辅助施药技术雾滴沉积飘移分布模型,对飘移率与各影响因素之间的关系进行了仿真研究,确定了不同风机转速下雾滴飘移率与其各影响因素之间的函数关系,并对模拟研究结果的准确性进行了试验验证。研究表明,所建模拟模型能够比较准确地反映风幕系统各作业参数对雾滴飘移率的影响规律,其中辅助气流喷射角度、喷头水平安装位置、自然风风速、风机转速,以及辅助气流喷射角度和自然风风速、辅助气流喷射角度和风机转速、喷头水平安装位置和自然风风速、自然风风速和风机转速的交互作用都对飘移率有显著的影响。

关键词: 喷杆喷雾机 气流辅助 超高地隙 飘移率 数值模拟

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0077-10

Anti-drift Technology of Super-high Clearance Boom Sprayer with Air-assisted System

Zhang Tie Yang Xuejun Yan Herong Wang Jun Dong Xiang

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

A droplet deposition and drift distribution model was established for super-high clearance boom sprayer with air-assisted system in accordance with the actual structure of sprayer. The CFD software ANSYS Fluent was used. The standard $k-\varepsilon$ turbulence model, discrete phase model and couple algorithm were adopted. The simulation test was designed to study the relationship of drift rate with its influencing factors. The functional relation of droplet drift rate with its influencing factors at different rotation speed of axial-flow fan was established and the accuracy of the simulation result was validated. The results showed that, the model was well fitted, and the parameters of air-assisted system can affect the drift significantly. These conditions include angle of air-assisted flow, nozzle horizontal position, natural wind velocity, rotation speed of axial-flow fan, interaction between angle of air-assisted flow and natural wind velocity, interaction between angle of air-assisted flow and rotation speed of axial-flow fan, interaction between nozzle horizontal position and natural wind velocity, interaction between rotation speed of axial-flow fan and natural wind velocity.

Key words Boom sprayer, Air-assisted system, Super-high clearance, Drift rate, Simulation

引言

喷雾作业过程中,雾滴飘移是造成环境污染、农

药流失和农药有效利用率低的重要原因之一。施药过程中,控制雾滴飘移、提高药液附着率是减少农药流失、降低对土壤及环境污染的一个重要措施。

收稿日期: 2012-04-10 修回日期: 2012-05-24

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA100901)和国际科技合作计划资助项目(2010DFA71310)

作者简介: 张铁,工程师,博士生,主要从事植物保护技术研究,E-mail: zhangtie1979@126.com

通讯作者: 杨学军,研究员,博士生导师,主要从事植物保护技术研究,E-mail: camms@263.net

风送式施药技术即在喷杆喷雾机的喷杆上增加风机和风筒,喷雾作业时在喷头上方沿喷雾方向强制送风,形成风幕,这样不仅增大了雾滴的穿透力,而且在有风(小于4级风)的天气下工作,也可减少雾滴的飘移现象,可节省施药量 20% ~ 60%^[1]。

随着计算机技术的发展,利用 CFD 模拟喷雾运动方式得到了很快的发展。通过这种技术对雾滴飘移进行的研究也取得了良好的成果。

Reichard 等首次通过风洞试验验证了利用 Fluent 软件模拟喷雾运动轨迹的准确性,模拟的雾滴飘移距离和利用风洞试验获得的数据基本一致。Walklate 等利用 Fluent 软件研究了一种气流辅助式喷雾机在对不同作物施药作业时,辅助气流对喷洒农药传输特性的影响。Tsay 等在对雾滴沉积的研究中,利用 Fluent 软件对多种不同参数组合的气动式罩盖喷雾进行了评估设计。Delele 等研究建立了风幕型风送式喷雾机雾滴沉积分布的三维模拟模型,并利用其模拟研究了该喷雾机按照喷杆式喷雾机参数配置后的抗飘移性能。Baetens 等利用 CFX 5.7 软件建立了 Hardi Commander 型喷杆风送式喷雾机雾滴飘移的三维模拟模型。研究了侧向风速、风向、拖拉机行驶速度、喷杆高度及掩蔽物后的尾迹对飘移率的影响,并完全按照国际标准 ISO 22866 完成田间试验,对模拟结果进行了验证^[2~7]。

目前,对喷杆喷雾机雾滴飘移率的研究工作一般都针对普通的喷杆喷雾机,而对高地隙喷杆喷雾机研究较少,在国内未见相关报道。本文以 3WZC-2000 型超高地隙风幕式喷杆喷雾机风幕系统为研究对象,利用数值模拟的方法,研究在不同影响因素条件下,风幕式防飘移技术对雾滴飘移率的影响,并进行试验验证。

1 风幕式防飘移技术仿真模型

1.1 模型的建立

利用 ICFM CFD 软件创建模拟区域,模拟区域的大小根据超高地隙喷杆喷雾机实际作业情况建立。由于喷杆及风幕为对称结构,因此只需对一侧喷杆的喷雾情况进行模拟。所建立喷雾过程模型区域如图 1 所示,整个区域长 13 m、宽 6 m、高 1.5 m。风幕安装角度 θ 以与自然风风向相逆为正向,其数值根据试验设计确定,风幕入口均为 $\phi 30$ mm 的圆孔,间距 40 mm,单侧设定 322 个风幕入口。喷头安装位置垂直距离地面 1 485 mm,水平距离根据试验设计确定,单侧设定 24 个喷头,喷头间距 500 mm。

设定长方体 $ABCD-OO_1O_2O_3$ 为作物区域,认为运动到该区域内的雾滴均沉积到标靶作物上。同时

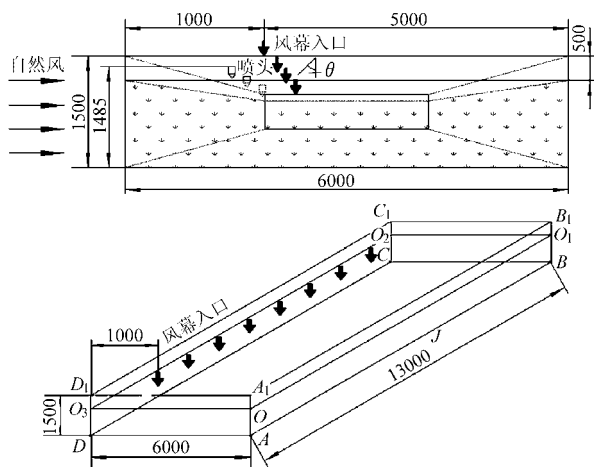


图 1 喷雾过程模拟区域示意图

Fig. 1 Structure and size of simulation zone

为了观察测定所有雾滴的运动轨迹、沉积量和飘移量分布情况,需为模拟区域定义一个飘移边界。Cooke 等指出当喷雾高度距离标靶作物 70 cm 时,气流辅助喷雾会造成比传统的喷雾方式高 5 ~ 15 倍的飘移损失;当喷杆高度降低到距离标靶作物 50 cm 左右时,可以有效地减少雾滴的飘移损失^[8]。因此,根据喷头高度,设定距离模拟区域顶部 500 mm 的 $OO_1O_2O_3$ 面为飘移损失边界,认为从风幕入口位置开始计算,雾滴运动 5 m 后仍未沉降到作物区域,即高于 $OO_1O_2O_3$ 面,沉积到 $A_1B_1O_1O$ 区域的雾滴认为产生飘移,即 $A_1B_1O_1O$ 为雾滴主要飘移区域。

1.2 模型的网格化及结果

利用 ICFM CFD 软件对模拟区域进行网格化处理。采用四面体非结构网格,风幕入口的网格间距为 4 mm,其他模拟区域的网格间距为 150 mm,最终得到的整个区域的控制单元总数为 1 796 382 个,实际模拟区域的网格化结果如图 2 所示。

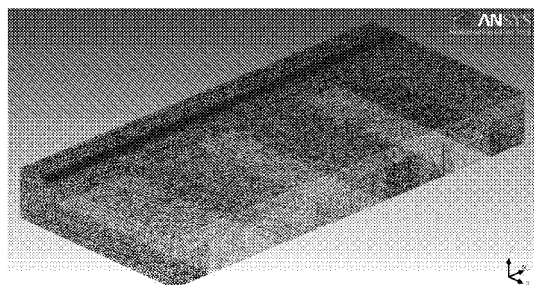


图 2 模拟区域网格化结果

Fig. 2 Grid result of simulation zone

1.3 模拟求解理论模型

模拟研究中,空气作为连续相,遵循质量守恒定律和动量守恒定律,在此基础上应用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行迭代求解。其模型的通用数学描述形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中 ϕ ——通用变量,可以代表 $u、v、w、t$ 等求解变量
 Γ_ϕ ——广义扩散系数
 S_ϕ ——广义源项 ρ ——流体密度

标准 $k-\varepsilon$ 方程数学模型为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

式中 $\sigma_k、C_D$ ——经验常数

μ ——湍流粘度^[9]

其他参数可参考 Fluent 用户手册。

雾滴为离散相,通过拉格朗日迭代法求解雾滴运动轨迹^[10-11]

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4)$$

式中 F_D ——颗粒相曳力 u_p ——颗粒相速度

ρ_p ——颗粒相密度

F_x ——颗粒相其他附加力

1.4 参数和边界条件设置

仿真过程中空气作为连续相,其参数设为:温度 293 K、压力 101.325 kPa、分子量 28.97 kg/kmol、粘度 $1.76 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、热效率 $0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、比热容 $1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 和湍动强度 20%。

由于大多数农药的主要成分均为水,因此将水作为离散相雾滴的研究介质。其参数设为:初始温度 293 K、密度 0.998 kg/L、蒸发温度 273 K、热效率 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、比热容 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、潜热 $2.26 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 和重力加速度 9.8 m/s^2 。

喷头均采用 TeeJet XR 8002 型扇形雾喷嘴,喷雾压力设为 0.3 MPa、对应流量为 0.013 L/s、雾滴粒径 14.22~351.46 μm 和分布指数 2.92,平均直径为 187.64 μm 。

边界条件设置:AA₁D₁D 为喷杆喷雾过程的对称中心面,故边界条件设置为 symmetry 型;模拟研究认为到达 DD₁C₁C、A₁B₁C₁D₁、BB₁C₁C、A₁B₁O₁O 区域的雾滴均被视为飘移,因此离散相的边界条件设置为 escape;研究认为 ABO₁O 和 ABCD 为作物所在区域,因此离散相雾滴经过该区域边界面的边界条件均设置为 trap^[12-14]。

2 风幕式防飘移技术模拟

2.1 飘移率影响因素及水平

本文主要对辅助气流喷射角度、喷头水平安装位置、自然风风速和风机转速 4 个因素对雾滴飘移

的影响情况进行研究,试验点依据中心组合设计方式布置。

(1)辅助气流喷射角度 θ

根据超高地隙喷雾机风幕气流方向的控制结构,风幕的气流出口可在 0~60°之间调节。与自然风逆向即顺时针方向为正。

(2)喷头水平安装位置 l

在喷头垂直安装距离不改变的前提下,研究喷头在水平方向不同安装位置对飘移率的影响。在模拟中,设喷头安装在风幕出口位置左侧时为负。

(3)自然风风速 v

大田喷雾作业的施药过程自然风的风速与雾滴的飘移损失有很大的关系。为了揭示气流的辅助作用,研究在不同的风速等级下,辅助气流对雾滴运动情况的影响。

(4)风机转速 n

在实际施药作业过程中,不同的风机转速,提供给风幕出口的辅助气流的速度不同,辅助气流速度对雾滴的飘移率有着很大的影响。本研究风机转速分别为 960、1 450、2 000 和 2 200 r/min 作为离散量引入试验研究。

各个影响因素编码水平如表 1 所示。

表 1 模拟变量因素水平
Tab.1 Simulation variable factors and levels

水平	因素		
	自然风风速 v / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	辅助气流喷射 角度 $\theta/(\text{°})$	喷头水平安装 位置 l/mm
-1.682	0	0	-168.18
-1	2.03	12.16	-100.00
0	5.00	30.00	0
1	7.97	47.84	100.00
1.682	10.00	60.00	168.18

2.2 风幕式防飘移技术评价指标

以雾滴飘移率作为风幕式防飘移技术的评价指标,其计算方法为

$$P = \frac{Q_D}{Q} \times 100\%$$

式中 P ——飘移率, %

Q_D ——单位时间内因沉积到标靶以外空间区域而损失的雾滴质量, kg/s

Q ——单位时间内喷雾作业所有喷嘴的喷施总量, kg/s

根据设计的模拟模型可以得知,该模型的 Q_D 即为 Inlet、Top、Side 和 Outlet 4 个边界的雾滴质量之和,对应的模型出口分别为 DD₁C₁C、A₁B₁C₁D₁、

BB_1C_1C 和 $A_1B_1O_1O$ 。

3 飘移率拟合模型建立和结果分析

3.1 飘移率拟合模型的选择

利用 Fluent 软件对喷雾过程进行模拟分析,并
利用 Design-Expert 软件对模拟结果进行分析计算,
得到飘移率模型拟合的方差分析结果如表 2 所示。

表 2 飘移率拟合模型方差分析结果
Tab.2 Results of variance analysis on drift rate fitting model

变异来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>	
均值 <i>vs</i> 总和	24 713. 95	1	24 713. 95			
线性项 <i>vs</i> 均值	5 186. 32	6	864. 39	50. 84	<0. 000 1	
交互项 <i>vs</i> 线性	504. 66	12	42. 05	3. 48	0. 000 6	
二次项 <i>vs</i> 交互项	268. 55	3	89. 52	11. 1	<0. 000 1	建议模型
残差	91. 24	36	2. 53			
纯误差	0. 35	20	0. 018			
总和	31 141. 41	80	389. 27			

3.2 各影响因素及交互作用对飘移率的影响

3.2.1 各因素对飘移率的影响

(1) 风机转速

由图 3 可以明显看出,风机转速对雾滴的飘移
率有显著影响。风机转速为 960 r/min 时,风量较
小,辅助气流胁迫雾滴运动的效果不显著;随着风机
转速升高,风量增大,辅助气流速度随之增大,增强
了雾滴的抗飘移性,使更多的雾滴沉积到标靶作物
上,从而减少了雾滴的飘移损失。

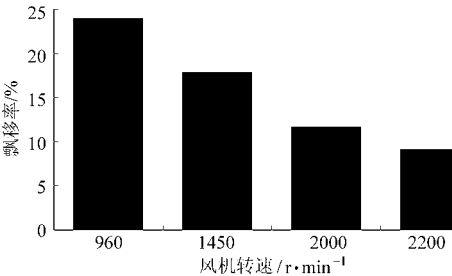


图 3 风机转速对雾滴飘移率的影响
Fig.3 Effect of rotation speed of axial-flow fan
on droplet drift rate

(2) 辅助气流喷射角度

分析图 4 可以看出,在安装位置给定的前提下,
不同风机转速时风幕系统的辅助气流喷射角度对飘
移率有显著影响。

当风机转速为 960 和 1 450 r/min 下,气流喷射
角度较小和较大时,所产生的飘移量基本相等,当气
流喷射角度为 30°左右时,对雾滴飘移潜能的影响
最大,其飘移率达到最低。当风机转速升高到 2 000
和 2 200 r/min 时,这一趋势有所变化,尤其当风机

二次多项式模型的方差分析在显著性水平为 0. 01
的条件下高度显著;相关系数为 0. 927 2,且预测拟
合度 $R^2_{Pre}=0. 858 8$ 、校正拟合度 $R^2_{Adj}=0. 900 8$,两者
非常接近,并且该模型的信噪比指标为 26. 038,这
些都表明该模型在设计区域内可信。因此,选用二
次多项式模型作为飘移率与各影响因素之间的最佳
拟合模型。

转速为 2 200 r/min 时最为明显,较小气流喷射角度
时所产生的飘移量更小。当角度超过 30°时,过高
的风机转速提供的风量对雾滴影响所产生的飘移率
反而与较低风速时产生的最大飘移量基本相等。产
生这一现象的原因是:高的风机转速提供较高速度的
辅助气流速度,当气流喷射角度过大,与自然风方向
相反的水平方向的气流速度要高于垂直方向的速度,
这样不仅使影响雾滴向下运动的气流速度变小,
而且水平方向的气流也加剧了对雾滴的扰动作用,
增加了雾滴向远离标靶区域方向运动的可能性,从
而使雾滴的飘移率变大。

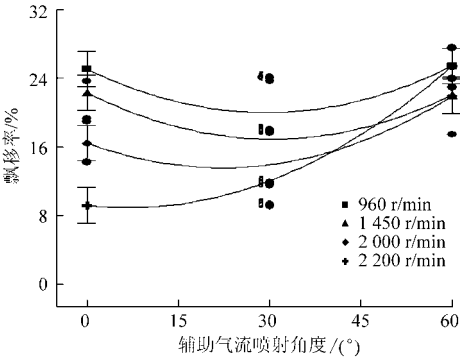


图 4 不同风机转速时辅助气流喷射角度
对雾滴飘移率的影响

Fig.4 Effect of angle of air-assisted flow on droplet
drift rate in different rotation speeds of axial-flow fan

(3) 喷头水平安装位置

由图 5 可看出,当风机转速为 960 和 1 450 r/min
时,喷头安装在风幕气出口内侧和外侧的飘移率
变化不太大。究其原因是因为此时,风幕出口的气

流速度较小,安装位置距离气流较远,受到的影响不大,主要还是受到自然风的影响。当风机转速为 2 200 r/min 时,安装位置距风幕出口外侧 200 mm 时的飘移率比风机转速为 1 450 r/min 时喷头水平安装位置在风幕出口内侧 200 mm 的飘移率还要高。由此可以看出,喷头安装在风幕气流出口内侧位置时的飘移率要比安装在风幕出口外侧时低,而且随着风机转速的升高这一现象更加显著。

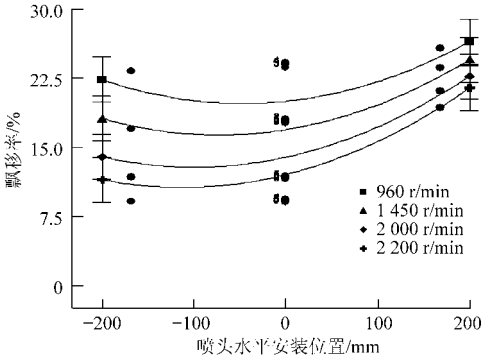


图 5 不同风机转速时喷头水平安装位置对雾滴飘移率的影响

Fig. 5 Effect of nozzle horizontal position on droplet drift rate in different rotation speeds of axial-flow fan

(4) 自然风风速

分析图 6 可以看出,当风机转速为 960 r/min 时,其最大飘移率可达到 38%。但随着风机转速增高,辅助气流的速度变大,风幕系统的抗侧风能力增强,使得雾滴的飘移潜能有所降低,当风机转

速达到 2 200 r/min 时,雾滴的飘移率可降低到 19% 左右。但总体看来,自然风风速对飘移率的影响基本呈线性增长,自然风风速对雾滴飘移有着显著的影响。

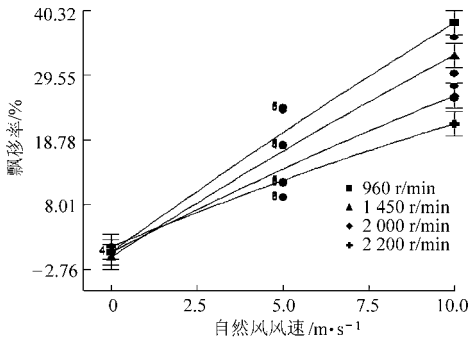


图 6 不同风机转速时自然风风速对雾滴飘移率的影响

Fig. 6 Effect of natural wind velocity on droplet drift rate in different rotation speeds of axial-flow fan

3.2.2 交互作用对飘移率的影响

图 7 为不同风机转速下,喷头安装在风幕出口正下方,即 $l=0$ 时,辅助气流喷射角度和自然风风速的交互作用对雾滴飘移率影响的曲面图。

从图 7 可看出,当风机转速在 960 和 1 450 r/min 下,自然风风速较低时气流喷射角度对雾滴飘移率的影响不大,当自然风风速升高,气流喷射角度在 30° 左右时可以获得较低的雾滴飘移率;当风机转速升高到 2 000 和 2 200 r/min 时,辅助气流喷射角度越小雾滴飘移率越低。分析其原因,是因为风机转

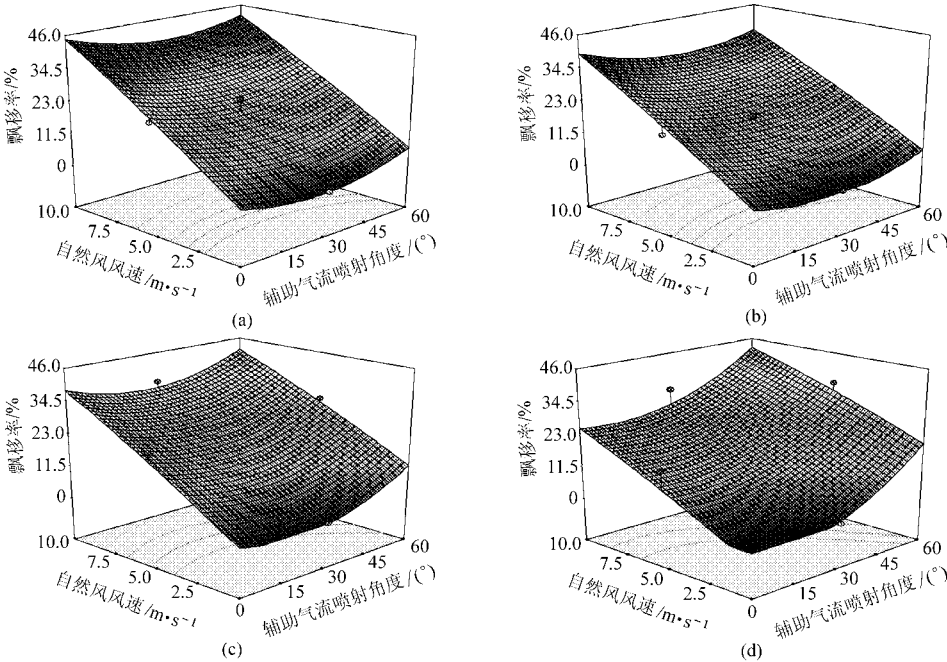


图 7 不同风机转速时辅助气流喷射角度和自然风风速交互作用对雾滴飘移率的影响

Fig. 7 Effect of interaction between angle of air-assisted flow and natural wind velocity on droplet drift rate in different rotation speeds of axial-flow fan

(a) 960 r/min (b) 1 450 r/min (c) 2 000 r/min (d) 2 200 r/min

速较低时,雾滴受自然风的影响更为显著;当风机转速升高,出口气流变大,由于喷头安装在风幕出口的正下方,因此较小的辅助气流喷射角产生的气流对雾滴运动的影响更显著,使雾滴的沉积轨迹发生变化,使其中部分容易发生飘移的雾滴由于运动轨迹

发生变化而沉降到标靶范围内,起到更好的防飘作用。

图 8 为不同风机转速下,辅助气流喷射角度为 30°时喷头水平安装位置和自然风风速的交互作用对雾滴飘移率影响的曲面图。

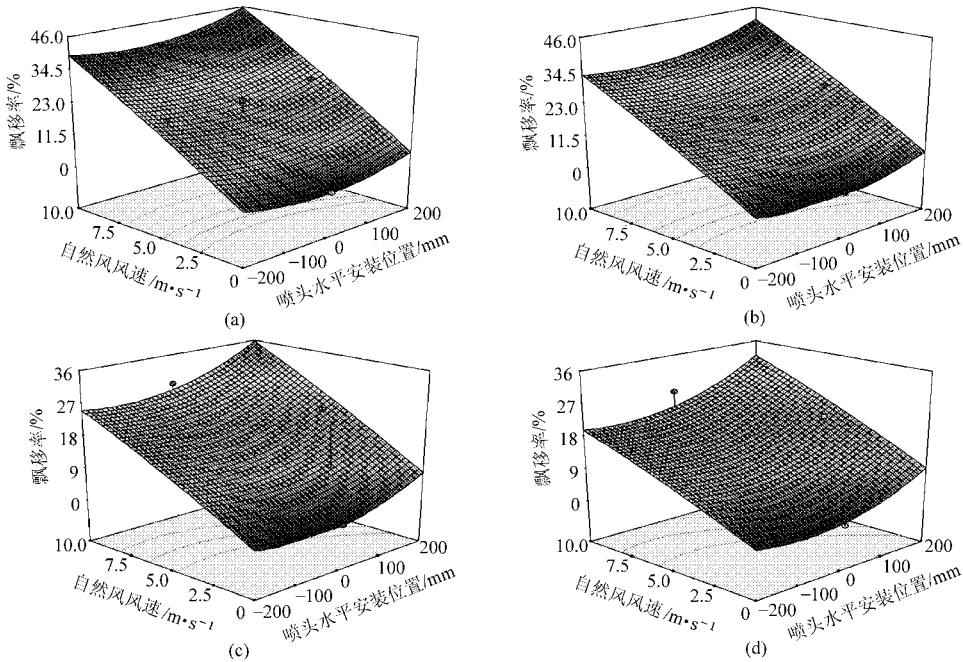


图 8 不同风机转速时喷头水平安装位置和自然风风速交互作用对雾滴飘移率的影响

Fig. 8 Effect of interaction between nozzle horizontal position and natural wind velocity on droplet drift rate in different rotation speeds of axial-flow fan
(a) 960 r/min (b) 1 450 r/min (c) 2 000 r/min (d) 2 200 r/min

从图 8 中看以看出,随自然风风速的升高,飘移率变大;喷头安装位置在风幕出口外侧,即 $l = 0 \sim 200$ mm,雾滴的平均飘移率增大,且不同风机转速下飘移率虽然不同,但总体变化趋势基本接近。结合雾滴的沉积过程分析原因,喷头安装在风幕出口外侧,辅助气流不能更好地胁迫雾滴向标靶区域运动,自然风对雾滴运动的影响更加显著,加剧了雾滴的飘移潜能。

3.3 模型拟合与评价分析

3.3.1 模型拟合系数的方差分析

飘移率拟合模型回归系数显著性的方差分析结果如表 3 所示。

从表中可以看出,模型的 F 为 37.34,表明所建模型显著。同时,从各影响因素及交互作用的 F 可以看出,在 5% 的显著性水平下,辅助气流喷射角度、喷头水平安装位置、自然风风速、风机转速,以及辅助气流喷射角度和自然风风速、辅助气流喷射角度和风机转速、喷头水平安装位置和自然风风速、自然风风速和风机转速的交互作用都对飘移率有显著影响。其中,对飘移率的影响程度从大到小依次为自然风风速、风机转速、喷头水平安装位置和辅助气

流喷射角度,其他因素影响程度相对较小。

表 3 飘移率拟合模型回归系数显著性方差分析

Tab.3 Significant variance analysis on regression coefficients of drift rate fitting model

方差来源	方差和	自由度	均方差	F	P	
模型	6 002.07	21	285.81	37.34	<0.000 1	显著
θ	142.84	1	142.84	18.66	<0.000 1	
l	182.26	1	182.26	23.81	<0.000 1	
v	4 219.69	1	4 219.69	550.89	<0.000 1	
n	728.86	3	242.95	31.74	<0.000 1	
θl	4.27	1	4.27	0.56	0.458 3	
θv	16.29	1	16.29	8.75	0.004 5	
θn	210.55	3	70.18	9.17	<0.000 1	
lv	10.52	1	10.52	5.65	0.020 8	
ln	17.03	3	5.68	0.74	0.531 7	
vn	223.66	3	74.55	9.74	<0.000 1	
θ^2	198.88	1	198.88	25.98	<0.000 1	
l^2	70.36	1	70.36	9.19	0.003 6	
v^2	4.72	1	4.72	0.62	0.435 5	
残差	443.95	58	7.65			

3.3.2 拟合模型的建立

在 5% 的显著性水平下,去除不显著的影响因素,不同风机转速时飘移率与其影响因素之间的拟合模型为

$$P = \begin{cases} 3.814\,55 - 0.299\,54\theta + 0.011\,742l + 4.408\,64v + C & (n = 960\text{ r/min}) \\ 3.369\,43 - 0.310\,25\theta + 0.017\,348l + 3.946\,19v + C & (n = 1\,450\text{ r/min}) \\ 1.268\,08 - 0.214\,59\theta + 0.023\,245l + 3.194\,04v + C & (n = 2\,000\text{ r/min}) \\ -3.204\,72 - 0.035\,470\theta + 0.026\,276l + 2.637\,88v + C & (n = 2\,200\text{ r/min}) \end{cases}$$

(5)

$(R^2 = 0.931\,1)$

其中

$$C = -8.925\,45 \times 10^{-3}\theta v + 9.507\,56 \times 10^{-4}lv + 5.837\,35 \times 10^{-3}\theta^2 + 1.104\,81 \times 10^{-4}l^2$$

4 风幕式防飘移技术模拟结果的试验验证

4.1 试验布置方案

试验中依据飘移模拟模型区域建立标杆,如图 9 所示。验证试验对单侧喷杆进行喷雾作业时的

雾滴飘移情况进行测量,因此将试验用标杆布置在喷杆一侧。标杆距离风幕气流出口位置 5 m,每个标杆之间间隔 1.3 m,共设 10 根标杆,如图 9a 所示。标杆竖直固定在水平地面上,各标杆高度为 2 m,雾滴采集样本用 2.5 cm 宽的试纸,沿水平方向固定在各标杆上,每行试纸垂直间隔 50 mm,最下端试纸距离地面高度 1 m,调节喷杆高度,使喷头距离地面高度为 1.5 m,如图 9b 所示。

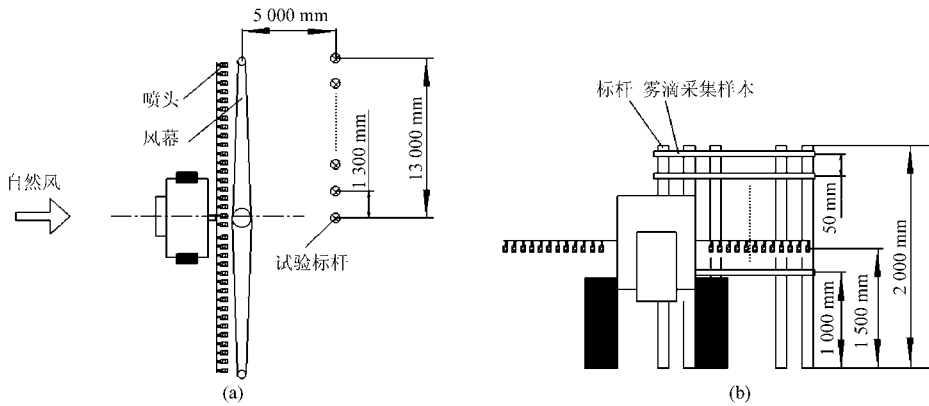


图 9 模拟结果验证试验布置方案
Fig. 9 Validation test program of simulation results
(a) 俯视图 (b) 前视图

4.2 试验方法

在试验验证中主要选择风机转速和风幕辅助气流喷射角度对雾滴飘移率的影响。试验过程中,选择风机转速为 0、960、1 450、2 000 和 2 200 r/min,辅助气流喷射角度为 0°、30°和 60°,喷头水平安装位置固定,距风幕出口内侧 100 mm。

试验在河北省涿水县中国农业机械化科学研究院生产基地进行,利用气候测量仪测得气温为 25℃,风速为 2.5~3.0 m/s。具体试验过程如下:

(1) 喷雾药液的配置:试验中,以罗丹明 B 为示踪剂检测各采集样本上的药液沉积量。使用电子天平称量 100 g 罗丹明 B 放入量杯中加水搅拌使之完全溶解后,倒入喷雾机药箱中,然后在药箱中加入额定容量的清水,启动喷雾机混合搅拌系统将试验液搅拌均匀。试验前测得罗丹明 B 喷雾药液的质量浓度为 568.54 mg/L。

(2) 标靶设置:按照图 9 布置试验标靶位置。

(3) 喷雾作业:将喷雾机停驶在自然风的下风

向进行喷雾作业。启动喷雾机,调节喷雾压力为 0.3 MPa,分别调节风幕系统风机转速为 0、960、1 450、2 000 和 2 200 r/min,调整风幕辅助气流流出风角度为 0°、30°和 60°,每次喷雾持续 10 min。各喷雾参数进行组合试验。

(4) 取样:每次喷雾完成后,将试纸从标杆上取下,分别装入样品袋后装入棕色玻璃瓶中。

(5) 测量:使用 200 mL 去离子水清洗试纸 0.5 h,将标靶上的罗丹明 B 完全洗脱,使用 Modulus 荧光分析仪测量浓度并记录,然后计算出单位面积标靶上雾滴的沉积量,即为雾滴的飘移量^[15-16]。

4.3 模拟结果和试验结果的转换

为了使药液采集区域的雾滴沉积量分布的模拟结果和试验中罗丹明 B 的沉积分布能够定量对比,需对其进行单位量转换,把飘移雾滴采集区域单位时间内沉积的雾滴质量转换为雾滴采集单元单位面积上荧光物质的沉积质量。其转换的计算公式为

$$M=10^3\frac{M_d tq}{\rho hH}\tag{6}$$

式中 M ——经转换后,模拟所得的单位面积罗丹明 B 的沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
 M_d ——转换前,模拟所得的雾滴在飘移采集区域内的沉积质量, kg/s
 t ——试验过程中喷嘴喷施药液雾滴的时间, s
 q ——试验时药箱中所配制的罗丹明 B 溶液的质量浓度, mg/L
 h ——雾滴飘移采集区域的高度,模拟时取为 50 cm
 H ——雾滴飘移采集区域的长度,模拟时取为 $1\,300\text{ cm}$

在试验过程中,药箱中所配置的罗丹明 B 溶液的浓度较小,对水密度的影响可以忽略,因此药液的密度可取为水的密度, $\rho=1\text{ kg}/\text{L}$ 。验证试验过程中,喷雾喷施药液雾滴的时间为 600 s 。

对标杆试验中的测量结果需进行转换,便可得到标杆各药液采集单元单位面积上示踪剂的沉积量

$$q'_i=\frac{q_iV_i}{ab}\tag{7}$$

式中 q'_i ——标杆上各药液采集单元单位面积示踪剂的沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
 q_i ——采集药液后滤纸清洗溶液中示踪剂溶液的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$
 V_i ——清洗各药液采集滤纸的蒸馏水的体积, mL
 a ——采集药液用滤纸的宽度, cm
 b ——采集药液用滤纸的长度, cm

4.4 试验结果

将模拟中飘移量结果和标杆试验中测得的结果分别代入式(6)和(7),得到风机转速和辅助气流喷射角度交互作用下各雾滴采集单元示踪剂的沉积量,具体结果和两者的对比如表 4 所示。这里把模拟试验测量结果作为准确值,则标杆试验结果的相对误差

$$E=\frac{|q_s-q_m|}{q_m}\times100\%\tag{8}$$

式中 E ——标杆试验结果的相对误差, $\%$
 q_s ——试验测量求得的单位面积雾滴飘移沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
 q_m ——CFD 模拟求得的单位面积雾滴飘移沉积量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

表 4 风机转速与辅助气流喷射角度交互作用下各采集单元示踪剂沉积量模拟与试验结果对比
Tab.4 Comparison of unit tracer deposition of simulation and experiment in interaction between rotation speed of axial-flow fan and angle of air-assisted flow

风机转速 / $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	辅助气流喷射角度/ $(^\circ)$								
	0			30			60		
	模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	试验值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	相对误差 / $\%$	模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	试验值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	相对误差 / $\%$	模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	试验值 / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	相对误差 / $\%$
0	420.28	288.64	31.32						
960	374.47	242.99	35.11	369.23	237.74	35.61	379.84	248.23	34.65
1 450	301.44	170.04	43.59	282.03	148.00	47.52	335.22	201.53	39.88
2 000	296.19	164.79	44.36	185.49	76.62	58.69	358.50	230.39	35.73
2 200	222.35	117.03	47.37	144.79	85.54	40.92	430.34	232.49	45.98

从表 4 可以看出,试验测得数值与模拟得到的结果之间的相对误差较大。分析其原因是由于实际标杆试验过程中,天气因素不可控制,无法完全控制自然风的风向,因此必定造成雾滴的飘移方向无法完全向设定的标杆方向运动,飘移到标靶以外的雾滴无法测量;同时,由于标杆上设定的示踪剂收集滤纸之间存在空隙,飘移到标靶位置的雾滴不能完全为滤纸接收,其中一部分从滤纸之间的空隙中飘失掉;而且在实际试验中,雾滴受大气温度和湿度的影响,存在一定的蒸发量。这三方面原因是造成相对误差较大的因素。但是,各组试验之间的总平均相

对误差值约为 42% ,在一定程度上可以保证对比分析结果的可信度。

4.5 对比分析结果

标杆试验结果和模拟结果的对比分析如图 10 和图 11 所示。通过对比发现:

- (1)辅助气流喷射角度对雾滴飘移率有显著影响,尤其当风机转速升高到 $2\,000\text{ r}/\text{min}$ 以上时,辅助气流角度超过 30° 时会使雾滴飘移率显著增加。
- (2)不同的风机转速对雾滴飘移率有显著影响,在辅助气流角度在 $0^\circ\sim30^\circ$ 之间时,风机转速越高,示踪剂的沉积量越少,即雾滴的飘移率越小。但

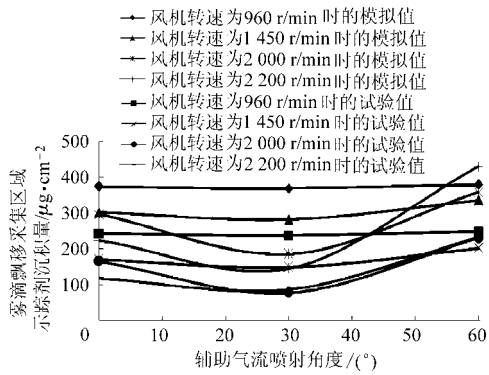


图 10 不同辅助气流喷射角度下模拟值与试验值对比
Fig. 10 Comparison of simulation and experiment results in different angles of air-assisted flow

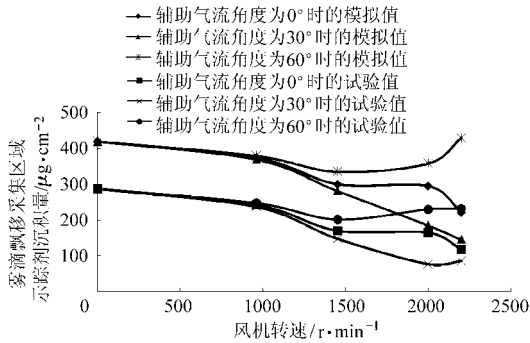


图 11 不同风机转速下模拟值与试验值对比
Fig. 11 Comparison of simulation and experiment results in different rotation speeds of axial-flow fan

在辅助气流喷射角度在 30°~60° 的区域内,风机转速越高,雾滴飘移率越大,风幕系统不仅不能减少飘移率,反而提高了雾滴飘移的潜能。

(3) 风机转速和辅助气流喷射角度的交互作用对雾滴飘移率的影响显著。

(4) 通过对比两图中对应的分布曲线可以看出,虽然由于实际试验误差的原因,相同条件下标杆

试验的飘移率要明显少于模拟的雾滴飘移量,但是模拟结果和标杆试验结果中各因素对雾滴飘移率影响的变化趋势基本相同。

4.6 试验误差分析

从试验结果的对比中可以看到,两组试验的结果有一定的差异。在标杆试验过程中,以下因素都有可能造成试验误差:①接收装置高度及宽度有限,不能完全拦截飘移的雾滴,飘失到边界和空中的雾滴无法进行测量。②自然天气条件的不可控性、温度和湿度造成的雾滴蒸发均会造成试验误差。③在仿真试验中,雾滴被释放时的初速度设定为 20 m/s,而在实际试验中无法测量喷雾的初始速度,可能会造成一定的误差。④模拟研究中认为雾滴到达边界均被捕捉,没有反弹的发生,但在试验过程中存在雾滴反弹的现象。

5 结论

(1) 通过对模拟结果的研究分析表明,在 5% 的显著性水平下,辅助气流喷射角度、喷头水平安装位置、自然风风速、风机转速以及辅助气流喷射角度和自然风风速、辅助气流喷射角度和风机转速、喷头水平安装位置和自然风风速、自然风风速和风机转速的交互作用都对飘移率有显著影响。其中,对飘移率的影响程度从大到小依次为自然风风速、风机转速、喷头水平安装位置和辅助气流喷射角度,其他因素影响程度相对较小。

(2) 通过对雾滴飘移率模拟结果和试验结果的对比分析表明,模拟和试验研究结果的变化趋势基本一致,CFD 模拟研究结果真实可靠,设计的模拟方法能够比较准确地反映风幕系统各参数对雾滴飘移率的影响效果。

参 考 文 献

1 杨学军,严荷荣,徐赛章,等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2002,33(6):129~131,137.
Yang Xuejun, Yan Herong, Xu Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(6):129~131,137. (in Chinese)

2 Reichard D L, Zhu H, Fox R D, et al. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift[J]. Transactions of the ASAE, 1992,35(3):755~758.

3 Reichard D L, Zhu H, Fox R D, et al. Computer simulation of variables that influence spray drift[J]. Transactions of the ASAE,1992, 35(5):1401~1407.

4 Walklate P J, Weiner K L, Parkin C S. Computational fluid dynamics: a tool for evaluating air-assistance sprayer design concepts[C]//ANPP-BCPC: Second International Symposium on Pesticides Application Techniques, 101~108. Binfield, Bracknell, Berkshire, U. K.: BCPC Publications,1993.

5 Tsay J, Fox R D, Ozkan H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1):47~54.

6 Delete M A, Jaeken P, Debaer C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1):16~27.

- 7 Baetens K, Nuytens D, Verboven P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):161 ~ 173.
- 8 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.
- 9 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,1988.
- 10 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- 11 ANSYS, Inc. ANSYS Fluent 12.1 user guide. Computational fluid dynamics software[M]. ANSYS, Inc., 2009.
- 12 Panneton B, Piché M. Interaction between application volume, airflow, and spray quality in air-assisted spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1):37 ~ 44.
- 13 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation [J]. Transactions of ASAE, 2004, 47(6):1 887 ~ 1 897.
- 14 傅泽田,王俊,祁力钧,等. 果园风送式喷雾技术气流速度分布特性模拟研究及验证[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 Chinese Society of Agricultural Engineering,2009, 25(1):69 ~ 74. (in Chinese)
- 15 GB/T 24861—2009/ISO 22866 植物保护机械喷雾飘移的田间测量方法[S]. 2005.
- 16 GB/T 24861.1—2009/ISO 22369-1 植物保护机械喷雾飘移量分级 第一部分:分级[S]. 2006.
- 17 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报,2010,41(2):62 ~ 67.
- Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):62 ~ 67. (in Chinese)
- 18 王军峰,黄继伟,黄俏梅,等. 气力辅助静电雾化的 PIV 试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(3):251 ~ 254.
- Wang Junfeng, Huang Jiwei, Huang Qiaomei, et al. PIV experimental study on air-assisted electrostatic spray[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3):251 ~ 254. (in Chinese)
- 19 贾卫东,李成,王贞涛. 高沉积静电喷雾装置试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(2): 244 ~ 248.
- Jia Weidong, Li Cheng, Wang Zhentao. Experimental study on electrostatic spraying device with better deposition [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 244 ~ 248. (in Chinese)
- 20 马中飞,张于祥,杨秀莉,等. 自吸式喷雾降尘性能试验[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1): 97 ~ 101.
- Ma Zhongfei, Zhang Yuxiang, Yang Xiuli, et al. Experiment on dust suppression performance of self-priming sprayer [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2012,30(1): 97 ~ 101. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- 3 Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Liu Yanfang, et al. Dynamic characteristic simulation of AT hydraulic system[C]. SAE Paper 2008-01-1683,2008.
- 4 汤鹏翔,刘艳芳,王书翰,等. 多片湿式离合器优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):291 ~ 294.
- Tang Pengxiang, Liu Yanfang, Wang Shuhan, et al. Optimal design of clutch in automatic transmission [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010,36(3):291 ~ 294. (in Chinese)
- 5 王书翰,徐向阳, Peter Tenberge,等. 液力变矩器液压系统设计与动态特性仿真[J]. 农业机械学报, 2009,40(5): 20 ~ 23,55.
- Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Peter Tenberge, et al. Hydraulic system design and dynamic characteristic simulation of torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5): 20 ~ 23,55. (in Chinese)
- 6 Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Liu Yanfang, et al. Design and dynamic simulation of hydraulic system of a new automatic transmission[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(4): 697 ~ 701.
- 7 王书翰,徐向阳,刘艳芳,等. 自动变速器液压系统设计与动态特性仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 860 ~ 864.
- Wang Shuhan, Xu Xiangyang, Liu Yanfang, et al. Design and dynamic simulation of hydraulic system for AT[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(7): 860 ~ 864. (in Chinese)