

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.035

果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验

姜红花¹ 牛成强² 刘理民³ 王东伟⁴ 王家胜⁴ 毛文华⁵

(1. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018;

3. 中国农业大学理学院, 北京 100193; 4. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109;

5. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 目前国内大多数果园风送喷雾机多通过控制风机转速或出风口截面积调整风量, 依据果树冠层特征实时变量调控风量的相关研究较少, 针对上述问题, 本文提出了一种基于果树冠层特征实时调整风量的单风机多风管旁路调风技术。分析对比了节流调风和旁路调风两方案风速调节能力和风场风速空间变化特性, 旁路调风结构风速与蝶阀开度线性变化关系更明显, 利于风量及风速的控制, 因而选择旁路调风方案。该方案基于果树分割冠层层数设置相应数量的扇形出风口, 构建了基于果树分割冠层特征的蝶阀开度模型, 并依据该模型计算各出风口处蝶阀的理论开度, 结合 PID 变量调控技术控制蝶阀实现各出风口风量实时调控进行变量喷雾。选择普通风送喷雾、自动对靶变量喷雾和变风量喷雾 3 种模式, 以雾滴沉积量和药液飘逸损失为指标, 对 3 种作业模式进行喷雾性能试验, 试验结果表明: 普通风送喷雾模式下农药飘移量及地面流失量最大; 变风量喷雾表面冠层的沉积量比自动对靶风送喷雾模式提高了 17.3%, 变异系数降低了 10.29 个百分点, 且果树冠层下、果树间的地面沉积量分别降低了 26.1% 和 40.7%, 飘移量相比于其他 2 种喷雾模式分别降低了 69.9% 和 50.9%。

关键词: 果园; 多风管; 旁路调风; 喷雾机; 试验

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0298-10

Design and Experiment of Air Volume Control System of Orchard Multi-pipe Air Sprayer

JIANG Honghua¹ NIU Chengqiang² LIU Limin³ WANG Dongwei⁴ WANG Jiasheng⁴ MAO Wenhua⁵

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

5. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, most domestic air-assisted sprayers of orchard adjust air volume by controlling fan speed or air outlet sectional area, not real-time regulation air volume according to characteristics of fruit trees. Orchard spraying has problems of pesticide waste and insufficient spraying. In order to solve above problems, a single fan multi - duct bypass-air conditioning technology was proposed. It can realize air-volume adjusted by controlling disc valve opening degree at the air outlet. In order to achieve accurate and rapid regulation of air volume, two kinds of variable air volume technologies of throttling and bypassing were designed and compared. The test results showed that the linear relationship between wind speed and butterfly valve opening of bypassing adjusting air was more obvious, which was more conducive to the control of air volume and wind speed. Bypassing air volume adjust technology was selected. Fan-shaped air outlets of corresponding number were set based on number of canopy layers of fruit trees. Butterfly valve opening model based on divided canopy characteristics was analyzed and constructed, and opening of each outlet butterfly valve can be calculated according to this model. It can control butterfly

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ001)和山东省重点研发计划项目(2019JZZY010706, 2015GNC112004)

作者简介: 姜红花(1971—), 女, 副教授, 主要从事物联网与自动控制研究, E-mail: j_honghua@sdau.edu.cn

通信作者: 毛文华(1974—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: mwh-924@163.com

valve opening combined with PID variable control technology and achieve the air volume control of each outlet for variable spray. Three spray mode among conventional air spray mode and automatic target air spray mode and variable air volume variable spray volume spray mode were selected to verify testing. The spray performance test of three operation modes was carried out based on droplet deposition and drift loss of pesticides. Test results showed that drift and ground loss of pesticides were the largest in conventional air spray mode among three spray modes. The amount of deposition on surface of canopy in variable air volume spray mode was increased by 17.3% compared with automatic target air delivery spray mode and the coefficient of variation was reduced by 10.29 percentage points. The amount of ground deposition under the canopy was decreased by 26.1%, and reduced by 40.7% between canopies. And the amount of drift was reduced by 69.9% and 50.9% compared with that of the other two spray modes.

Key words: orchard; multi-pipe; branch air; sprayer; experiment

0 引言

目前我国果园多采用普通风送式施药机械,相较传统施药机械,具有可穿透树膛内部使树叶两侧着药等优点^[1],但采用一致的喷雾参数,导致农药在部分作业区域内存在过喷或喷施不足的现象^[2],严重影响水果生产品质^[3]。

果园精准变量施药技术包括果园喷药量精准调控技术和风送量调控技术,其中风送量调控技术是依据风速风量需求理论及建立的风场雾场模型进行风送量调控。围绕风送量调控技术,国内外学者在风速风量需求理论、风场与雾场分布建立方法和风力调节技术与装置等方面做了大量工作^[4-9]。戴奋奋^[10]提出了果树风量需求“置换原则”和风速需求“末速度原则”,为风送喷雾作业风量需求计算提供了理论基础;DEKEYSER等^[11]使用CFD仿真技术对风送喷雾机外部空间进行了风场模拟,并在实验室条件下进行了测试和验证,显示CFD结果和测试结果吻合;李龙龙等^[12]针对果园喷雾风量调节需求,设计了可以根据经验参数公式调节风量的风送喷雾机;邱威等^[13]在风箱内部设置导风板和调风板以调节风箱内部和出口处气流方向。以上研究多通过改变风机转速以达到改变风量的目标,但风机转速调控响应较慢,不能根据果树冠层特征实时调整风量,且存在风机受损等潜在问题^[14-17]。

为提高雾滴沉积量,减少农药飘移,本文在变风量喷雾作业研究基础上,依托果树冠层信息采集技术、冠层体积在线计算方法等^[18-19],设计一种果园多风管风送喷雾机。整体风送系统采用旁路调风结构,改装电控蝶阀,并构建以果树冠层特征为依据的蝶阀开度计算式,在风机转速恒定情况下通过电控装置控制各出风口处蝶阀开度,以实现不同高度出风口风量独立调控,实时根据冠层特征进行变风量喷雾作业,以果树叶片雾滴沉积量和药液飘逸损失为依据,对其作业性能进行试验,以期提高变量喷雾

作业质量和水平。

1 整机设计

本文设计的果园多风管风送喷雾机整机结构如图1所示,主要由施药系统、旁路调风系统、下位机控制系统、汽油机等组成,可根据采集到的果园不同冠层的参数信息调控风量,实现按需喷雾的目的。具体工作过程为:安装在机体两侧的传感器融合阵列,不间断地扫描两侧果树冠层信息,同时,安装在车体底部的速度传感器实时检测机体的速度信息,将电压信号传递至信号处理单元;信号处理单元实时将数据流传递至微控制器;微控制器将得到的原始信息进行数据滤波等一系列处理后,将数据流上传至上位机;上位机根据由喷雾参数及用户需求形成的喷雾决策模型得到所需风量,控制电控蝶阀不同阀芯位置,改变出风口风量,最终实现果园变风量喷雾。

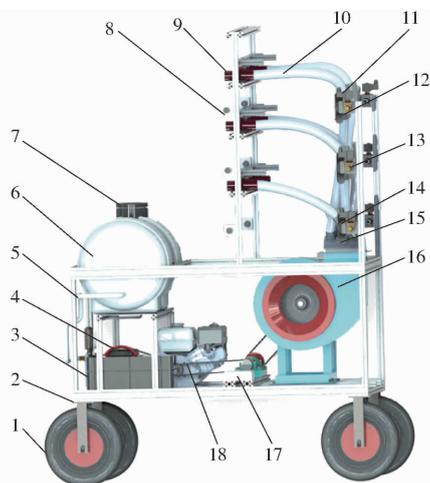


图1 单风机多风管旁路调风果园变量喷雾机整体结构图

Fig. 1 Machine structure diagram of single fan multi-pipe bypass orchard variable sprayer

1. 车轮 2. 速度传感器 3. 蓄电池箱 4. 柱塞泵 5. 液路管道
6. 药箱 7. 投入式液位计 8. 距离传感器 9. 控制蝶阀 10. 疏风管
11. 电磁阀 12. 扇形出风口 13. 超声波传感器 14. 扇形喷嘴
15. 导流装置 16. 离心风机 17. 下位机控制盒 18. 汽油机

2 变量风送系统设计

文献[20-23]进行了履带自走式果园自动对靶风送喷雾、基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法、果树冠层体积在线计算方法及多态自动对靶风送式喷雾等研究,但为实现农药减量增效,减少农药飘逸,提高农药在果树冠层内沉积分布的均匀性,还需进行施药装置风量调控技术研究。本文设计节流调风及旁路调风两种变风量方案,对比分析两方案风速调节能力和风场风速空间变化,提出依据不同果树冠层特征改变出风口风量的方法,以实现通过控制风量达到精准喷雾的目的。

2.1 风量调控方案设计

根据冠层体积确定风量,对提高雾滴沉积率、减少雾滴飘移有非常重要的意义。本文拟设计一种单风机多风管各出风口的风量调控方案,通过对应不同分区冠层设置独立出风口,拟通过分区冠层特征参数确定单个出风口的合理风速进而调整风量以优化喷雾效果。图2为气流分配器及控制蝶阀相结合的两种结构,通过两种结构调风特性对比选择较优结构。其中图2a为节流调风结构,可通过控制电机改变蝶阀的通路进而改变出风口风量;图2b为旁路调风结构,通过三通连接褶皱管与出风口、泄风口,通过改变蝶阀的开启程度改变泄风口风量,间接改变出风口风量。

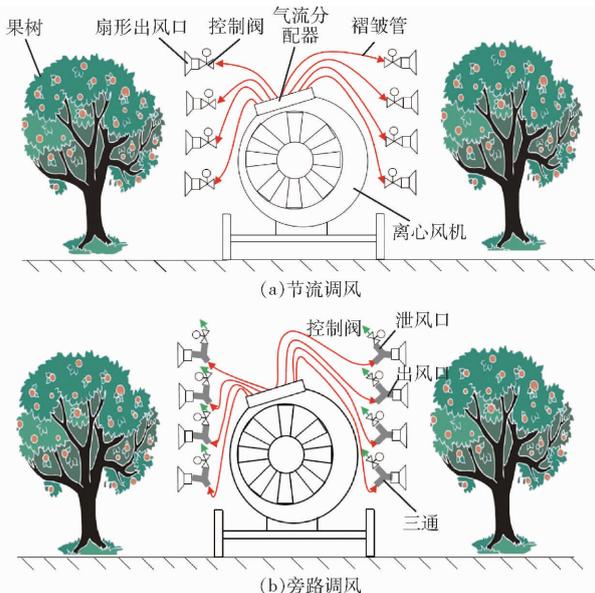


图2 两种调风方案结构

Fig. 2 Structure of wind regulation scheme

2.2 蝶阀开度控制阀设计

单风机多风管变风量喷雾技术需要响应速度快的控制阀,而主流的控制阀从全闭到全开的时间在30s左右,响应时间长且控制方法单一,为此本文设

计了一款控制蝶阀;依据控制阀的特点在直流电机、步进电机、伺服电机及舵机中,选择了在体积相同情况下,具有动力大、响应速度快等优点的数字舵机。选择MG995数字舵机作为控制电机来控制蝶阀,动作响应快、扭矩大、可编程,工作温度为-40~60℃,5V空载作业情况下2.8ms/(°),当分别输出500、1000、1500μs高脉冲周期信号时,舵机的位置为0°、45°和90°。通过在DN50(内径56mm)手动蝶阀上加装MG995数字防水舵机,设计了图3所示的控制蝶阀,该控制蝶阀的输出轴与蝶阀阀芯同轴且方便安装在喷雾机机架上。本文采用PID调节控制蝶阀的开度,以提高控制精度。

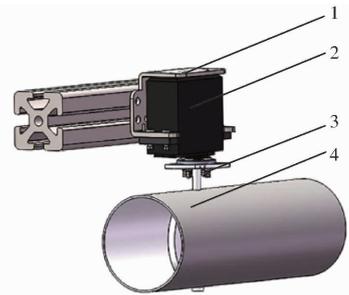


图3 蝶阀结构示意图

Fig. 3 Schematic of butterfly valve structure

1. 舵机支架 2. 舵机 3. 舵机盘 4. 蝶阀

2.3 风速调节能力试验

对旁路调风和节流调风的调风特性进行研究,以选择较优可控的整体调风结构,按照两种设计方案,改装了两种调风结构对应试验装置,如图4所示。2018年7月2日,在山东农业大学8号楼前进行了两种结构的风速相关试验。启动离心风机,控制蝶阀开度,实现控制阀从全闭到全开,每个开度状态下待出风口风速稳定时,使用手持风速测量仪分别在扇形出风口上、中、下侧测量出风口风速,取3个位置风速测量值的平均值为一次测量数据,重复进行3次,取3次测量数据平均值作为每个开度状态的风口速度。



(a) 节流调风装置 (b) 旁路调风装置 (c) 风速测量

图4 调风试验及风速测量

Fig. 4 Wind speed measurement

本试验基于3次测量求平均值的方法,得到两种不同调风方案在不同状态下的风速测试结果如图5、6所示。

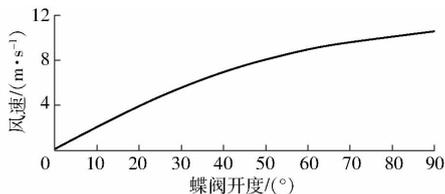


图 5 节流调风风速变化曲线

Fig. 5 Velocity change curve of throttle air

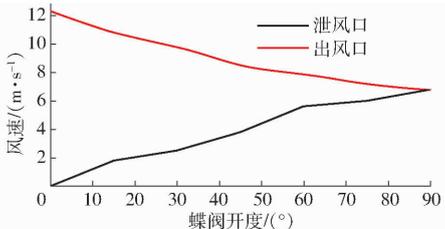


图 6 旁路调风风速变化曲线

Fig. 6 Velocity change curves of branch air

由图 5 可知,节流调风方案中蝶阀开度与出风口风速呈正相关,但两者线性关系不明显,不利于通过控制阀体开度得到理论风速调整风量,且当阀体开度小于 50°时,出口风速较小,然而风送式喷雾是利用风速对雾滴的破损作用和胁迫作用提高施药效率,出风口风速低会造成末速度过低,导致冠层树叶难以翻转,药液沉降率尤其是在叶片背面的沉降率会大大降低。

由图 6 可知,旁路调风方案中,蝶阀开度与泄风口风速、出风口风速均呈线性变化关系,并且出风口风速与蝶阀开度负线性关系较为明显,利于通过蝶阀开度控制风速得到合理风量,且其出风口最小风速较大。

2.4 风场风速特性试验

风管出风口风场风速的空间变化决定雾滴的空间分布及沉积量,为了探究节流调风和旁路调风风场风速的空间变化,确定最优的调风方案,于 2018 年 7 月 19 日在山东省果树研究所泰安天平湖试验示范基地使用样机进行了实地试验测试。

试验方法:喷雾机共有 8 个出风口,每侧有 4 个出风口,选取右侧的 4 个出风口,如图 7 所示。使用 RS455 modbus 型风速传感器测量蝶阀在 4 种开度 (22.5°、45°、67.5°、90°) 下的出风口风速。从距离地面 20 cm 处由下往上每隔 100 mm 作一标定点,共取标定点 16 组,如图 8 所示。将竹竿竖直放置在距出风口水平距离 500、1 000、1 500 mm 的 3 个位置。数字舵机控制阀门开度,风速仪测量 4 个出风口的 3 个水平位置、4 个阀门开度、16 个垂直标定点的风速,即每个风口的风速测量采用均匀布点的方式,测试现场如图 9 所示。

两种调风结构的蝶阀作用位置不同(图 2),将



图 7 出风口标定图

Fig. 7 Wind opening mouth marking

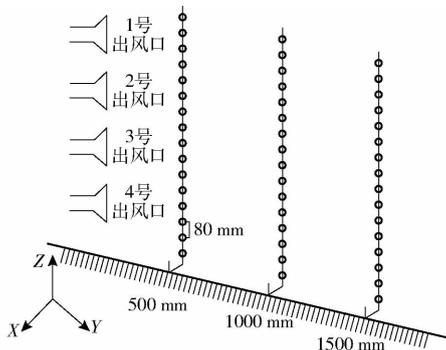


图 8 测试布置图

Fig. 8 Test point layout



图 9 现场测试图

Fig. 9 Testing scene

测得数据进行处理得到了出风口风速与距地面高度、距出风口水平距离的三维响应面图,按出风口风速由大到小排列,如图 10 所示,可知对于节流调风:随着蝶阀开度减小,风场风速减小,风速的作用中心在距地面 80 ~ 120 cm 范围内,水平方向随着距出风口距离的增大,风速在不同的阀体开度下表现不同,阀体全开和半开时风速随着水平距离的增大而减小,阀体开度 67.5°时风速随水平距离在 50 ~ 70 cm 范围内迅速下降,阀体开度 22.5°时随着水平距离的增大风速先下降后增高,究其原因是为了快速响应风速变化需求,将控制蝶阀放置在出风口附近,控制蝶阀阀片对经过的气流造成扰动,导致出风口风速不稳定,且由尼龙绳吹向

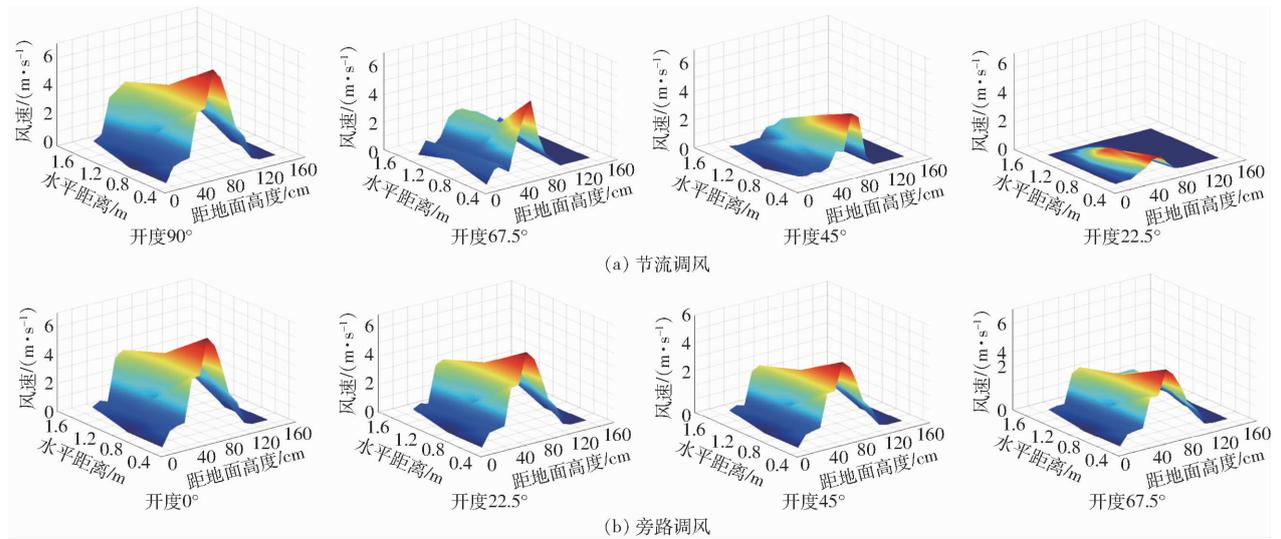


图10 节流调风和旁路调风风场风速变化

Fig. 10 Wind field changes of throttle air and branch air

可知随着蝶阀开度的减小气流向一侧偏移。对于旁路调风,随着蝶阀开度的增大,出风口风速减小,风速的作用中心在距地面80~120 cm处,随着水平距离的增大,风速呈线性缓降趋势,且由尼龙绳吹向可知,随着蝶阀开度的增大气流方向基本不改变。

综上所述,与节流调风相比,旁路调风结构阀体开度与出风口风速线性关系更为明显,更利于风速控制,且其风场风速随水平距离增大变化更均匀,更有利于胁迫雾滴吹向冠层,因此选择旁路调风结构作为变风系统结构。

3 基于冠层特征的蝶阀开度模型构建

实现风量按需调控需要实时在线探测果树冠层体积信息,即冠层的高度、长度及宽度,依据冠层体积信息计算风速风量需求,并实时控制风送执行机构供给合适的风量,使其经过输送空间损失后以恰当大小的风量灌入果树冠层中,本文基于冠层信息建立蝶阀开度模型,通过控制单个出风口处蝶阀开度改变出风量进而进行变风量喷雾,工作系统流程如图11所示。

3.1 基于传感器融合阵列的冠层信息采集方法

建立基于冠层特征的风量需求需要实时检测冠层信息,非接触式测距传感器相比于其他冠层信息探测技术具有控制简单、电路易实现、成本低等优点,为了获取高精度的果树冠层信息,本文针对果树上、中、下冠层稀疏度不同的特点设计了一种基于多传感器阵列的果树冠层信息采集方法。

选取6种具有代表性的测距传感器,分别为GQ6M-A2-X7型红外测距传感器、NU40F30TR-

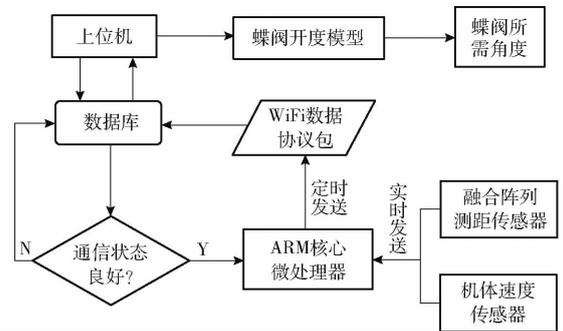


图11 基于冠层特征计算蝶阀所需开度流程图

Fig. 11 Calculating required opening of butterfly valve based on canopy characteristics

1MD型超声波传感器、NU112F30TR-1MD型超声波传感器、GLS-B80型激光传感器、Leica DISOTM系列的D510型激光测距传感器和SICX-DX35型激光测距传感器,分别进行动态识别测试试验。为模拟果园复杂作业环境,在不同光照条件下对传感器进行识别能力测定,得到GLS-B80型激光传感器、Leica DISOTM系列的D510型激光测距传感器在室外条件下无法传回正确信息,不能用于果园实地喷雾作业的信息采集,GQ6M-A2-X7型红外测距传感器能检测到目标但无法标定传感器到目标距离,NU112F30TR-1MD型超声波传感器与NU40F30TR-1MD型超声波传感器束波角不同,NU112F30TR-1MD型超声波传感器测量精度更高,符合要求,因此本文采用NU112F30TR-1MD型超声波传感器和SICX-DX35型激光测距传感器。

在连续型密集果园、纺锤型稀疏果园和单株型稀疏果园进行测距传感器标定试验。分别利用2种传感器在3种果园果树冠层上、中、下层收集冠层宽度信息,将测得的冠层宽度与实际冠层宽度进行比较,得到相对误差如表1所示。

表 1 上、中、下冠层宽度相对误差

Tab. 1 Relative error of upper, middle and lower canopy width

%

冠层 位置	连续型密集果园		纺锤型稀疏果园		单株型稀疏果园	
	SICX - DX35 型	NU112F30TR - 1MD 型	SICX - DX35 型	NU112F30TR - 1MD 型	SICX - DX35 型	NU112F30TR - 1MD 型
上层	16.4	14.7	11.4	26.1	21.8	11.6
中层	12.6	11.5	13.3	21.7	19.9	10.5
下层	10.4	16.9	19.5	17.0	11.3	14.8

由表 1 可知,对于连续型密集果园上、中层采用超声波传感器,下层采用激光传感器为最优传感器融合阵列;纺锤型果园下层采用超声波传感器,上、中层采用激光传感器为最优传感器融合阵列;单株型稀疏果园下层选择激光传感器,上、中层采用超声波传感器为最优传感器融合阵列。

3.2 果树冠层体积在线计算方法

由 3.1 节提出的基于传感器融合阵列的冠层信息采集方法,将非接触式测距传感器 3 个 1 组,以相同的间隔垂直安装在机体的两侧,机体行驶过程中两侧的非接触式测距传感器不断扫描检测其与果树之间的距离;同时,安装在机体上的速度编码器实时获取机体的速度,单片机对传感器收集到的距离及机体速度采用相关的算法处理,并储存处理后的数据。通过存储的速度数据计算得到一定时间内机体行驶距离及分区冠层宽度。由传感器与果树间距离即得分区冠层宽度,机体行驶距离即分区冠层长度,传感器安装间隔即分区冠层宽度,进而计算果树连续分区冠层体积。

图 12 为离散分割冠层体积构建示意图,在时间 t_1 内,离散化分区冠层体积计算式为

$$V_{ia} = db_1 h_f \quad (1)$$

式中 V_{ia} ——离散化分区冠层体积, m^3

d ——机体行驶距离, m

b_1 ——分区冠层宽度, m

h_f ——分区冠层高度, m

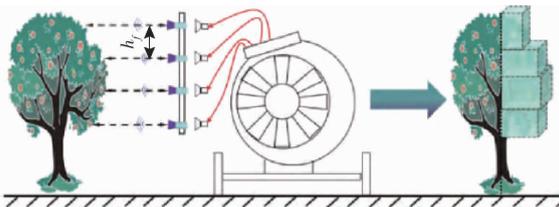


图 12 在线离散分割冠层体积构建示意图

Fig. 12 Schematic of online discrete segmentation canopy volume construction

3.3 基于冠层体积的蝶阀开度模型

旁路调风结构中,进风量与泄风口风量、出风口风量理论上应满足

$$Q_z = Q_x + Q_c \quad (2)$$

式中 Q_z ——进风量, m^3/s

Q_x ——泄风口风量, m^3/s

Q_c ——出风口风量, m^3/s

本方案通过改变泄风口风量间接调节出风口风量。方案中保持出风口面积不变,改变风速从而改变出风量。为了使控制蝶阀能够精确地控制出风口的风量,需拟合控制蝶阀开度与出风口风速之间的数学关系,将旁路调风结构实际试验测定的阀体开度与出风口风速数据导入 Matlab 的 cftool 工具箱中进行相关的统计学分析(图 13),得到了出风口风速与控制蝶阀开度之间的关系模型

$$k_f = -0.06119f_k + 12.01 \quad (3)$$

式中 k_f ——出风口风速, m/s

f_k ——蝶阀开度, ($^\circ$)

统计分析结果显示其相关系数达到 0.9902,相关性较好,拟合度较高。

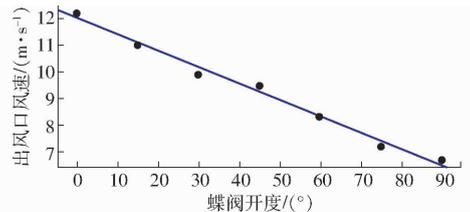


图 13 风速拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves

如图 13 所示,有部分拟合风速略小于实际风速,而实际工作过程中会存在管道漏风等现象,所以理论出风口风速大于或等于出风口风速测量值,即图 14 所示出风口风速参考线为合理出风口风量模型曲线,该曲线拟合公式为

$$k_f = -0.0611f_k + 12.2 \quad (4)$$

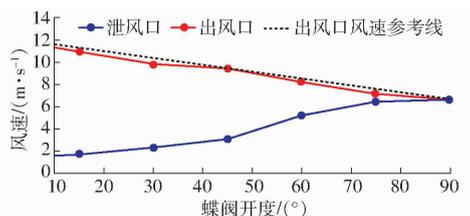


图 14 风量模型曲线

Fig. 14 Air volume model

利用式(4)求得风量理论值与实际值之间的关系,其误差在 0.015% ~ 5.799% 之间,满足变风量精度要求。

根据置换原则,风机所产生的风量应能够置换所对应的冠层空间内气体。由3.2节可知,在 t_1 时间内,若离散化分区冠层体积为 V_{ia} ,则分区冠层所需要的理论风量 Q_m 计算公式为

$$Q_m = V_{ia} k_b k_c \quad (5)$$

式中 k_b ——气流衰减系数,取为1

k_c ——置换空间系数,取为0.6

果园多风管风送喷雾机在工作过程中,离心风机提供恒定的总风量,气流分配器将总风量平均分配给每个扇形出风口,若每个扇形出风口的面积恒定为 S_c ,则单个扇形出风口的出风量与风速的关系式为

$$Q_g = k_f S_c \quad (6)$$

式中 Q_g ——单个扇形出风口的实际出风量, m^3/s

由风量按需调控原则,根据分区冠层特征得到的理论风量 Q_m 应与各分区冠层对应独立出风口实际风量 Q_g 相等,得各对应出风口控制蝶阀开度应为

$$f_k = 199.67 - 592 \frac{db_1 h_f k_b k_c}{S_c} \quad (7)$$

4 喷雾机性能试验

4.1 试验仪器与方法

为测试单风机多风管变风量喷雾机喷雾效果,

于2018年7月27日在山东省果树研究所泰安天平湖试验示范基地进行喷雾性能试验,自然风速为 0.33 m/s 。试验材料包括水敏纸、甲基紫溶液示踪剂和乙醇分析醇等,本试验利用雾滴沉积量和飘移损失量评价其效果。

选取经过修剪后的3棵高纺锤型苹果树作为试验对象,树高 3.5 m ,冠层直径 1.9 m ,株距 2 m ,树龄8年。试验时根据果树的冠层形状以及枝叶稀疏程度,将冠层以 $5 \times 4 \times 3$ 方式分割,即分为5个横截面(A、B、C、D、E)、4个纵截面(1、2、3、4)和3个轴曲面。横截面间距 0.7 m ,纵截面间距 0.6 m ,F1层为冠层表层,F2层位于果树冠层内部距离F1层为 L_1 ,F3层为果树冠层中间层,与F2层距离为 L_2 , $L_1 \approx L_2 = 0.35 \text{ m}$,如图15所示。每个界面交点处叶片上设置水敏纸1张(规格 $76 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$)用以采集冠层雾滴沉积效果。在冠层下方地表设定3组水敏纸布点G1、G2、G3,用以采集雾滴地面损失,其中G1、G3位于树间,G2位于树下。将试验后采集的水敏纸扫描成png格式的图像,利用重庆六六山下植保有限公司的雾滴分析软件进行统计分析得出单位面积的雾滴个数、覆盖率及药液沉积量,根据采集到的果树冠层叶面积分布得出果树冠层沉积量。

为得到药液飘逸损失,在冠层的外侧距离树干

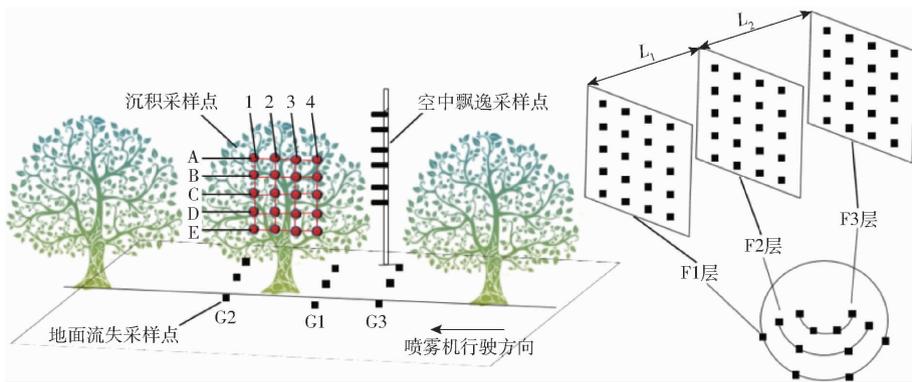


图15 采样点布置示意图

Fig. 15 Sketch map of sample arrange

0.3 m处垂直立杆5根,每个杆由上到下布置10个点,将试管刷固定到每个点上用以捕捉飘逸雾滴。试验用 2.5 g/L 的甲基紫溶液作为示踪剂,在进行喷雾作业前进行母液的标定采集,喷雾作业之后利用乙醇分析醇对空中飘逸采集点的试管刷进行充分洗脱处理,利用分光光度计测定处理后的溶液,与标定的母液进行对照得到飘移沉积量。喷雾机具在表2所示普通风送喷雾(CABS)、自动对靶喷雾(DAJS)、变风量喷雾(VARS)3种工作模式下进行正常的喷雾作业,每种模式下利用上述方法测试3次,统计各指标值。

表2 不同喷雾模式参数

Tab. 2 Spray parameters of each mode

喷雾模式	工作速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单侧喷头数量	喷头流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	喷雾压力/ MPa	喷量/ ($\text{L} \cdot \text{hm}^{-2}$)	出风口风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
CABS	0.4	4	1.46	0.4	512	12
DAJS	0.4	4	1.46	0.4	可调	12
VARS	0.4	4	1.46	0.4	可调	可调

4.2 试验结果

表3为不同喷雾模式对各果树冠层沉积量的影响。由表3可知,3种喷雾作业模式下,冠层内外的

沉积量均从外侧到内部表现出逐渐减少的趋势，F1、F2、F3 层沉积量分布箱体图如图 16 所示。在变风量喷雾模式下旁路调风结构可以根据靶标的冠层特征参数进行实时风量调整，F1 层沉积量明显高于自动对靶喷雾模式，变异系数降低了 10.29 个百分点，低于普通风送喷雾模式，但沉积分布的均匀性较其他两种模式作业显著提高。在果树 F2 层变风量喷雾的沉积量略低于自动对靶喷雾模式，普通喷雾模式下在果树冠层的 F1、F2、F3 层的沉积量均高于其他两种模式，图 17 为 F1 层雾滴采集水敏纸扫描图像，可以看出普通喷雾模式下明显施药过量。

表 3 雾滴沉积量

Tab. 3 Deposit rate of droplets

冠层位置	指标	VARS	DAJS	CABS
F1 层	平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	9.36	7.98	9.45
	标准差/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	2.70	3.27	4.18
	变异系数/%	28.77	39.06	42.94
F2 层	平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	5.4	5.68	6.65
	标准差/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.56	2.40	3.11
	变异系数/%	29.62	41.60	46.90
F3 层	平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	1.69	2.16	2.95
	标准差/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	0.60	0.64	0.85
	变异系数/%	36.22	30.32	28.85

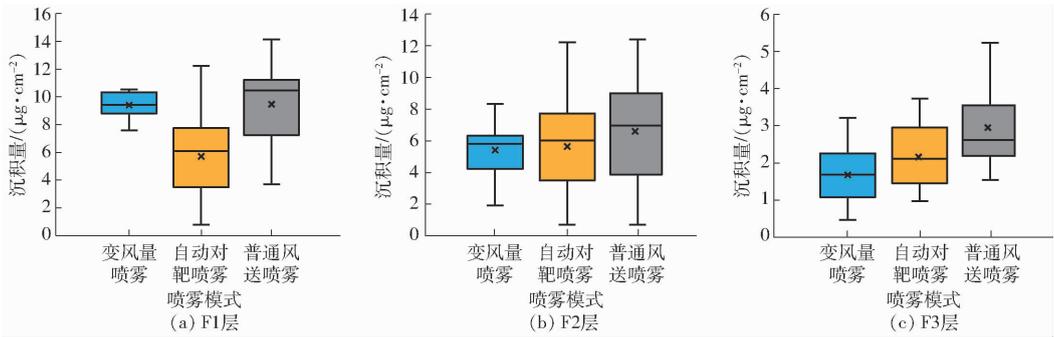


图 16 各层沉积量分布箱体图

Fig. 16 Distribution of deposition amount in each layer



图 17 喷雾沉积扫描图

Fig. 17 Spray deposition

普通风送喷雾和自动对靶喷雾在各个不同高度的出口雾滴飘散动能不变，当植株冠层发生变化时，尤其是冠层宽度较小时，同等高度的冠层表现出雾滴飘

移量明显增大，冠层横截面的雾滴沉积量分布离散程度增大，如图 18b、18c 所示，采用旁路调风结构的变风量喷雾液沉积量离散程度较小，如图 18a 所示，同等高度的冠层内外雾滴沉积量呈递减趋势。

图 19 为 3 种喷雾模式对雾滴空中飘移量和地面沉积量影响。结果表明，变风量喷雾可降低雾滴损失。普通风送喷雾的空中飘移量最大 ($1.83 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)，这是由于普通风送喷雾风量大、喷量大，雾滴容易穿过冠层内侧飘移到空中，变风量喷雾模式飘移量为 $0.55 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，明显低于其他两种喷雾模式，分别降低了 69.9% 和 50.9%。M2 为果树冠层下的地面流失量，M1、M3 为果树间隙下的地面流失量，普通风送喷雾在冠层间隙时仍然进行喷雾作业，大量雾滴沉积到地面，导致地面流失最多。因此设计的变风量喷雾模式能够减少雾滴飘移及多余药液损失。

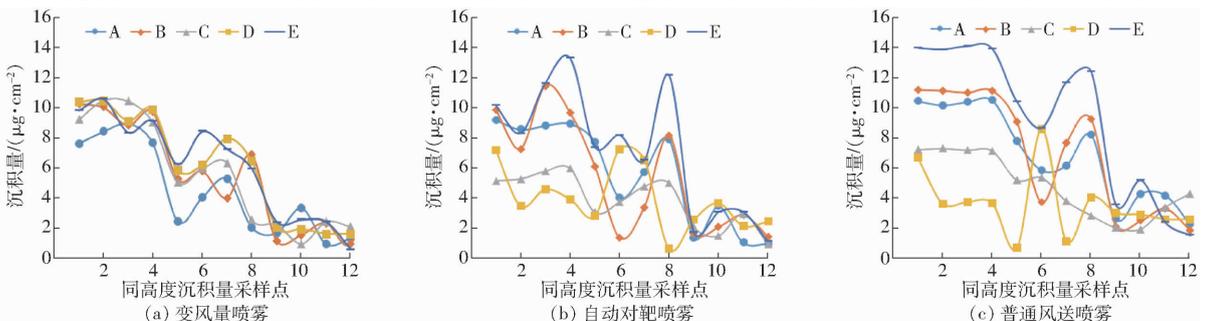


图 18 横截面沉积量分布

Fig. 18 Distribution of deposition in each cross section

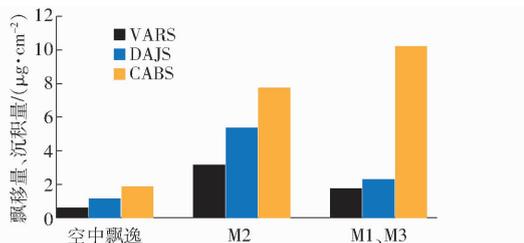


图19 地面沉积量及空中飘移量

Fig. 19 Distribution of loss to air/ground

5 结论

(1)设计了一种单风机多风管变风量喷雾机系统,对风送系统的结构、控制蝶阀等进行了选型、结构设计,通过试验对比了节流及旁路调风量方案的调风能力和风场风速空间变化特性,并选择作用中心稳定、出风口风量变化线性可控的旁路调风方案

作为变风系统结构。

(2)构建了基于冠层特征的分割冠层蝶阀开度模型,通过模型控制蝶阀开度调整风量。经实际测量对比,通过蝶阀开度与出风口风速的关系曲线计算得到的理论风速与实际风速相对误差在0.015%~5.799%之间,依据开度模型调控得到的风速在误差允许范围内,风量按需调整方案合理可行。

(3)在3种喷雾模式中,普通风送喷雾模式的农药飘移量及地面流失量最大。变风量喷雾F1层的沉积量明显高于自动对靶喷雾模式,变异系数降低了10.29个百分点,而果树下、果树间的地面沉积量均少于另外两种模式,且飘移量比其他两种喷雾模式分别降低了69.9%和50.9%,喷雾效果良好,满足变量喷雾作业要求。

参 考 文 献

- [1] 翟长远,赵春江,WANG Ning,等.果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J].农业工程学报,2018,34(10):1-15.
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Ning, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 1-15. (in Chinese)
- [2] 何雄奎.我国植保无人机喷雾系统与施药技术[J].农业工程技术,2018,38(9):33-38.
HE Xiongkui. China plant protection UAV spray system and application technology [J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(9): 33-38. (in Chinese)
- [3] 何雄奎.中国植保机械与施药技术研究进展[J].农药学报,2019,21(增刊):921-930.
HE Xiongkui. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2019, 21(Supp.): 921-930. (in Chinese)
- [4] 邱白晶,闫润,马靖,等.变量喷雾技术研究进展分析[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. (in Chinese)
- [5] 周良富,薛新宇,周立新,等.果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J].农业工程学报,2017,33(23):80-92.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80-92. (in Chinese)
- [6] 马驰,李光林,李晓东,等.丘陵山地柑橘果园多方位自动喷雾装置研制[J].农业工程学报,2019,35(3):31-41.
MA Chi, LI Guanglin, LI Xiaodong, et al. Development of multi-orientation automatic spraying device for citrus orchards in hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 31-41. (in Chinese)
- [7] 徐莎,翟长远,朱瑞祥,等.喷雾高度可调的果园风送喷雾机的设计[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):1-6.
XU Sha, ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, et al. Design of an orchard air-assisted sprayer with adjustable spray height [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(11): 1-6. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] QIU W, ZHAO S, DING W, et al. Effects of fan speed on spray deposition and drift for targeting air-assisted sprayer in pear orchard [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9: 53-62.
- [10] 戴奋奋.风送喷雾机风量的选择与计算[J].植物保护,2008,34(6):124-127.
DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air assisted sprayers [J]. Plant Protection, 2008, 34(6): 124-127. (in Chinese)
- [11] DEKEYSERR D, DUGA A, VERBOVEN P, et al. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114: 157-169.
- [12] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等.基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):70-76.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese)

- [13] 邱威,丁为民,汪小岳,等. 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):26-30,44. QIU 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, 44. 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. (in Chinese)
- [14] RYSZARD H, GRZEGORZ D, WALDEMAR Ś, et al. Variable air assistance system for orchard sprayers, concept, design and preliminary testing[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163:134-149.
- [15] MIRANDA-FUENTES A, RODRÍGUEZ-LIZANA A, GIL E, et al. Influence of liquid-volume and airflow rates on spray application quality and homogeneity in super-intensive olive tree canopies[J]. Science of the Total Environment, 2015, 537: 250-259.
- [16] FRISO D, BALDOIN C, PEZZI F. Mathematical modeling of the dynamics of air jet crossing the canopy of tree crops during pesticide application[J]. Applied Mathematical Sciences, 2015, 9:1281-1296.
- [17] SALCEDO R, GARCERA C, GRANELL R, et al. Description of the airflow produced by an air-assisted sprayer during pesticide applications to citrus[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2015,13:1-15.
- [18] 俞龙,洪添胜,赵祚喜,等. 基于超声波的果树冠层三维重构与体积测量[J]. 农业工程学报,2010,26(11):204-208. YU Long, HONG Tiansheng, ZHAO Zuoxi, et al. 3D-reconstruction and volume measurement of fruit tree canopy based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 204-208. (in Chinese)
- [19] 李瀚哲,翟长远,张波,等. 果园喷雾靶标探测技术现状分析[J]. 农机化研究,2016,38(2):1-5. LI Hanzhe, ZHAI Changyuan, ZHANG Bo, et al. Status analysis of orchard spray target detection technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 1-5. (in Chinese)
- [20] 刘理民,王金宇,毛文华,等. 基于传感器融合阵列的果树冠层信息采集方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):347-353,359. LIU Limin, WANG Jinyu, MAO Wenhua, et al. Canopy information acquisition method of fruit trees based on fused sensor array[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):347-353,359. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.046. (in Chinese)
- [21] 刘理民,张晓辉,石光智,等. 多态自动对靶风送式喷雾试验台的设计与试验[J]. 江苏农业科学,2019,47(13):260-263. LIU Limin, ZHANG Xiaohui, SHI Guangzhi, et al. Design and test of polymorphic automatic target air-blast spray test-bed [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 260-263. (in Chinese)
- [22] 姜红花,刘理民,张晓辉,等. 面向精准喷雾的果树冠层体积在线计算方法[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):120-129. JIANG Honghua, LIU Limin, ZHANG Xiaohui, et al. Online calculation method of fruit trees canopy volume for precision spray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 120-129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.012. (in Chinese)
- [23] 姜红花,白鹏,刘理民,等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):189-195. JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 189-195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. (in Chinese)

(上接第 274 页)

- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 24677.2—2009 喷杆喷雾机 试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [21] 王佳文,杨自栋. 自动调平喷杆式喷药机设计与试验研究[J]. 农机化研究,2016,38(7):162-166. WANG Jiawen, YANG Zidong. Design and experimental research on automatic levelling boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 162-166. (in Chinese)
- [22] 王凯坡,方春伟,孙广斌,等. 基于 ABAQUS 卧式螺旋离心机转鼓系的模态分析[J]. 石化技术,2016,23(6):3-4. WANG Kaipo, FANG Chunwei, SUN Guangbin, et al. Modal analysis of drum system for horizontal screw centrifuge by ABAQUS[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(6): 3-4. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [24] 王深研,杨柏松,房欣. 低漂移低药量喷杆喷雾机试验研究[J]. 现代化农业,2017(5):71-72. WANG Shengyan, YANG Baisong, FANG Xin. Experimental study on low drift and low dose sprayer[J]. Modernizing Agriculture, 2017(5): 71-72. (in Chinese)
- [25] 李锟,付亚萍,王伟全,等. 微型喷药机设计与试验研究[J]. 农机化研究,2018,40(8):118-123. LI Kun, FU Yaping, WANG Weiquan, et al. Design and experimental research of the small sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 118-123. (in Chinese)