

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.006

3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机^{*}

邱威^{1,2} 丁为民^{1,2} 汪小昆^{1,2} 龚艳³ 张晓辛⁴ 吕晓兰³

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;

3. 农业部南京农业机械化研究所植保与环境工程技术中心, 南京 210014;

4. 南京林业大学经济管理学院, 南京 210037)

【摘要】 针对现代果园低矮密植的种植特点, 设计了3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机。通过理论计算和虚拟样机技术, 完成整机结构设计和各关键部件技术参数的确定。设计了适应于低矮密植果园的圆环双流道风送雾化装置, 确定叶轮直径0.7 m、出风口宽度0.13 m。实现风机转速0~2 000 r/min的无级变速。田间试验结果表明, 树膛内部枝叶正、反面雾滴附着率分别为61.22%、20.90%; 树膛外部枝叶正、反面雾滴附着率分别为77.22%、37.17%; 作业效率为1.02 hm²/h。

关键词: 果园喷雾机 自走式 风送 试验**中图分类号:** S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0026-05

3WZ-700 Self-propelled Air-blowing Orchard Sprayer

Qiu Wei^{1,2} Ding Weimin^{1,2} Wang Xiaochan^{1,2} Gong Yan³ Zhang Xiaoxin⁴ Lü Xiaolan³

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

3. Plant Protection and Environmental Engineering Technology Center, Nanjing Research Institute of
Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

4. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract

According to modern orchard planting pattern, a kind of self-propelled air-blowing orchard sprayer was developed. Adopting theoretical calculation and virtual prototype technology, the whole structure design and the key components technical parameters were determined. A ring fan was designed for modern orchard. The impeller was 0.7 m and outlet width was 0.13 m. The step-less transmission of fan was accomplished from 0 to 2 000 r/min. The field experiment showed that the front deposition reached to 61.22% and other side reached to 20.90% inside the trees. In the surface of the trees, the front deposition reached to 77.22% and other side reached to 37.17%. The operation efficiency reached to 1.02 hm²/h.

Key words Orchard sprayer, Self-propelled, Air-blowing, Experiment

引言

病虫害防治是果园中重要的管理作业, 果树在一年中的生长期要喷施农药8~15次^[1]。目前, 我国大多数果园仍然使用手动踏板式喷雾机和手推

式喷雾车等效率相对较低的机械, 这种药械对操作人员危害大、作业效率低, 经常错失防治的最佳时机, 达不到群防、群治的目的。病虫害复发蔓延, 不得不加大施药次数和药剂量, 过量使用农药造成土壤、水体等农业环境的污染, 同时也导致了农产品中

收稿日期: 2011-06-08 修回日期: 2011-07-11

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA100903、2012AA101904)**作者简介:** 邱威, 博士生, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: qiuweipass@163.com**通讯作者:** 丁为民, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: wmding@njau.edu.cn

农药残留超标和病虫害抗药性增加等问题^[2~5]。

国外果园喷雾机普遍采用风送喷雾技术,配套的拖拉机底盘类型齐全。国内许多科研单位为研制高效、喷雾质量好,省水、省药的果园喷药机械作了大量工作并取得了一些科研成果^[1,6-7]。但研制的果园植保机械多为悬挂式、牵引式,机具尺寸偏大。现代果园多采用低矮密植型种植模式,传统的施药器械存在入园难、伤果率高的问题,已不能适应我国果园的发展形势。鉴于此,在充分消化吸收国外果园植保机械先进技术的基础上,研制 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机,并进行试验。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构及主要技术参数

低矮密植型果园行距为4~5 m、株距1~3 m、树高3 m左右,冠厚1.5~3 m、干高较矮,平均干高为0.5~1 m。由于冠厚接近行距,两行果树枝叶几

表 1 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机主要参数

Tab.1 Parameters of orchard sprayer

参 数	外形尺寸 (长×宽×高)/ mm×mm×mm	结构 质量 /kg	配套 动力 /kW	作业 幅宽 /m	喷雾 高度 /m	最小 地隙 /mm	药箱额 定容积 /L	液泵 类型	液泵 流量 /L·min ⁻¹	风机叶 轮直径 /mm	风机调 速范围 /r·min ⁻¹	搅拌 方式	喷嘴 形式	喷雾量 /L·min ⁻¹
数值	3 645×1 415×1 765	780	28	4~5	3	135	400	隔膜泵	50	700	0~2 000	液力射 流式	圆锥雾 喷头	1.2

1.2 工作原理

喷雾机工作时,动力经动力分配箱分别传递到液泵、风机等作业部件。药液从药箱经管路到分配阀,一部分回流到药箱起调压和搅拌作用,其余经管路、喷头喷出。根据作业环境,实时监测和调控风机转速和喷雾压力,进行风力辅助喷施作业。

1.3 动力传递系统

喷雾机传动系统主要包括分动箱、传动主轴以及液泵、风机、行走等各装置的传动系统。为了满足行走、喷雾、风送等作业要求,设计了由分动箱、传动主轴、过渡轴和传动胶带组等组成的液泵、风机装置传动系统。

发动机将动力传到变速箱,一路驱动喷雾用隔膜泵,另一路到分动箱,再分为两条传递路线,其一通过万向联轴器传递到后桥,驱动车轮;其二通过万向联轴器传递到同步胶带组,再通过静液压装置驱动风机(图2)。通过风机转速调节装置,可以实现风机的无级变速。

喷雾、风送和行走支路作业传动比分别为 $i_1 = \frac{z_2 z_{12}}{z_{11} z_{13}} = 0.218$ 、 $i_2 = \frac{z_3 z_6}{z_4 z_5} = 3.033$ 和 $i_3 = \frac{z_1 z_{10} z_8}{z_{10} z_9 z_7} = 0.095$ 。通过合理分配传动比,不仅使传动机构结构

乎交接,造成果园密闭,机械作业困难^[8]。本果园喷雾机采用自走式,其作业过程包括注水、混药、喷射和风送等工序,并能单边作业。机具的总体设计如图1所示,主要由底盘、传动系统、风送系统、药箱管路系统、液泵和喷头组等组成。主要技术参数如表1所示。

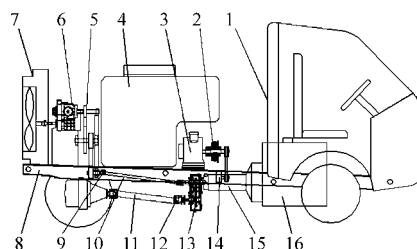


图 1 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机整体结构

Fig. 1 Structure of orchard sprayer

1. 驾驶室 2. 电磁离合器 3. 隔膜泵 4. 药箱 5. 传动胶带组
6. 静液压装置 7. 风机 8. 车架 9. 12. 万向节联轴器 10. 风
机支路传动主轴 11. 行走支路传动主轴 13. 分动箱 14. 取力
器 15. 变速箱 16. 发动机

尺寸较小,还使液泵、风机以及行走装置获得各自所需的功率和工作速度。机具作业时,变速箱输出转速为 700 r/min,风机转速可以达到 2 000 r/min,作业速度 1.0 ~ 1.2 m/s。

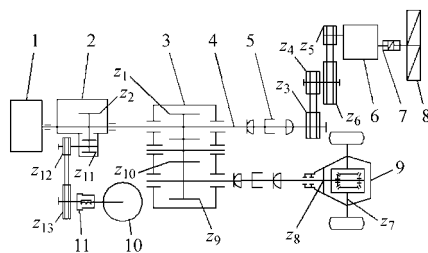


图 2 3WZ-700 型自走式果园风送定向
喷雾机机械传动原理图

Fig.2 Structure diagram of transmission system for orchard sprayer

1. 发动机 2. 变速箱 3. 分动箱 4. 动力输出轴 5、11. 电磁离合器 6. 静液压装置 7. 弹性联轴器 8. 风机 9. 后桥 10. 隔膜泵

2 关键部件及其主要参数

2.1 风送系统与风机

2.1.1 风送系统

置换原则是目前果园风送喷雾机风量计算中普

遍采用的一种方法^[8]。其原理为:喷雾机风机吹出带有雾滴的气流,应能驱除并完全置换风机前方直至果树的空间所包容的全部空气。如果喷雾机作业时,其风机转速和行进速度不变,根据置换原则的原理(图3),这时风机的风量稍大于梯形立方体的体积。即

$$\frac{Q}{2} \geq (H_1 + H_2) \frac{v}{2} LK \quad (1)$$

式中 Q ——风量, m^3/s

H_1 ——树冠层高, m

H_2 ——出风口高度, m

v ——喷雾机作业速度, m/s

L ——喷雾机与树的距离, m

K ——气流衰减和沿途损失系数

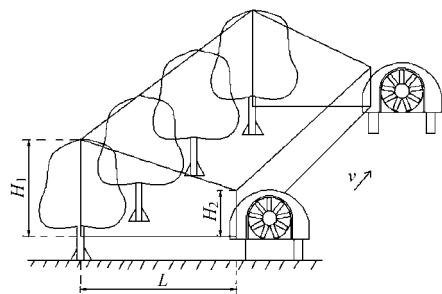


图3 果园风送喷雾机置换原则计算简图

Fig.3 Air displacement system for orchard sprayer

各参数的取值范围为: $v = 1.0 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 、 $H_1 = 2.0 \sim 2.5 \text{ m}$ 、 $H_2 = 0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 、 $L = 1.3 \sim 1.8 \text{ m}$ 、 $K = 1.3 \sim 1.6$,因风送距离较近取 $K = 1.4$ 。

将上述参数代入式(1)中,求得风量为 $4.2 \sim 9.8 \text{ m}^3/\text{s}$,拟定 $Q = 5.0 \text{ m}^3/\text{s}$,全压 $P_t = 400 \text{ Pa}$ 。根据风机计算公式^[9]可得

$$N = \frac{QP_t}{1000\eta_i\eta_m} = \frac{5 \times 400}{1000 \times 0.98 \times 0.9} \approx 2.2 \text{ kW} \quad (2)$$

式中 N ——风机的轴功率, kW

η_m ——机械效率 η_i ——叶轮效率

取工作转速 $n = 1400 \text{ r/min}$,则比转速为

$$n_s = n \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{P_t}{9.8}\right)^{\frac{3}{4}}} = 194 \quad (3)$$

查《机械工程手册》^[9],取轮毂比 $\nu = 0.46$ 、统计经验系数 $K_u = 2.1$,则叶轮外径为

$$D_2 = \frac{242K_u \sqrt{\frac{P_t}{9.8}}}{\pi n} \approx 0.70 \text{ m} \quad (4)$$

所以,确定风机叶轮外径 $D_2 = 0.70 \text{ m}$,轮毂直径 $D_1 = \nu D_2 = 0.46 \times 0.70 \approx 0.30 \text{ m}$,风机进口直径 $D_3 = 0.74 \text{ m}$,进口半径 $R = 0.37 \text{ m}$ 。

2.1.2 圆环双流道风送雾化装置

圆环双流道风送雾化装置结构如图4所示,集流器轴向进风,径向出风。在气流拐角处设置弧圈形导流片,以减少流动损失^[10]。弧圈形导流片将径向风道一分为二形成双流风道,周围安装多个可调角度的分风导风板。环形导流罩壳内,风机叶片与导风板之间装有一组导流风栅。并在挡风板与出口扩压器之间安装调风板,根据果树最低枝杈离地距离来调整调风板的角度,从而控制气流方向。

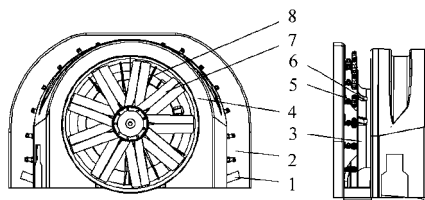


图4 圆环双流道风送雾化装置系统结构图

Fig.4 Structure of ring-type dual channel fan

1. 调风板 2. 挡风板 3. 弧圈形导流片 4. 集流器 5. 喷头

6. 分风导风板 7. 叶轮 8. 叶片

圆环双流道风送雾化装置的设计要遵循风的末速度原则,即风送雾化装置的气流到达树体时,其速度不能低于某一数值;否则气流进不了树体,只能绕树而过。因为在作业过程中,气流不仅要携带雾滴,还要翻动枝叶、驱除和置换树体中原有的空气,这些功能的实现,都要求气流具有一定的动能。

根据试验结果,果园风送作业末速度约为 9 m/s 时,雾滴沉积密度可达到 $20 \text{ 滴}/\text{cm}^2$,满足风送式果园喷雾机作业质量(NY/T 992—2006)标准的规定^[8]。风送雾化装置的参数如图5所示。

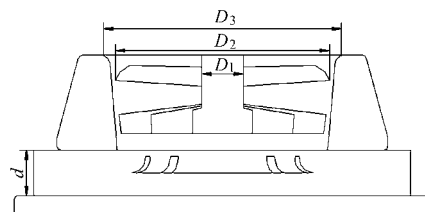


图5 风送雾化装置参数

Fig.5 Parameters of orchard sprayer

根据通过截面的风量相等,可以得到风机出口风速为

$$v_1 = \frac{v_2 H_1}{H_2 K} = \frac{9 \times 2.2}{0.8 \times 1.4} = 17.68 \text{ m/s} \quad (5)$$

式中 v_2 ——气流到达树体的末速度, m/s

风机进口风速为

$$v_3 = \frac{Q}{\pi \left[R^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \right]} = \frac{5}{3.14 \times (0.37^2 - 0.15^2)} = 13.9 \text{ m/s} \quad (6)$$

出风口宽度为

$$d = \frac{\pi(R^2 - r^2)v_3}{Wv_1} \tag{7}$$

式中 r ——风机轮毂半径, m

W ——出风口弧长, $W \approx \pi D_2 = 2.2 \text{ m}$

经计算可得: $d = 0.13 \text{ m}$ 。圆环双流道风送雾化装置的设计可以满足喷雾风送作业对风量风速的要求。通过调节调风板和多个分风导风板控制气流方向, 可以实现对果树的定向风送喷雾。

2.1.3 无级变速风机控制系统

当前我国各地密植果园布局形态不一, 不同品种果树的生长期冠层也不一样。所以需要实时调节风速, 保证良好的喷雾效果。目前, 国内外调节风速的装置主要有遮流板减少风机进气量、挡板调节出口气流量等。这两种调节方式不改变风机的转速, 利用经验来调节风量变化。采用风速自动调控和静液压传动装置能够实现风机的无级变速, 实时改变转速, 调节风量。通过传动比的计算, 确定风机转速可以达到 2 000 r/min, 而通过步进电动机调节静液压装置油路阀门开度可以实现风机 0 ~ 2 000 r/min 的无级变速。风机无级变速控制系统结构示意图如图 6 所示。

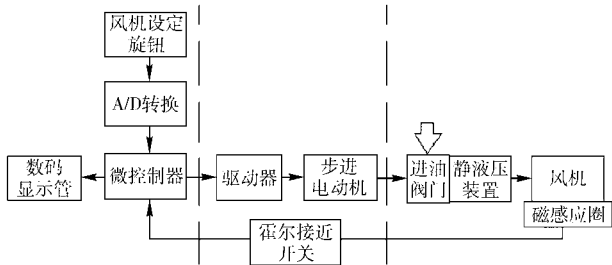


图6 风机无级变速控制系统

Fig. 6 Variable speed control of orchard sprayer

利用霍尔 Y1-D15C1 型传感器测量风机轴的转动圈数。在风机的轴上装有磁感应圈, 为了保证磁感应器高速旋转时的平衡性, 齿数为 6, 对称分布。

$$Z = \frac{M - 1}{6T} \tag{8}$$

式中 Z ——风机转速, r/min

M ——单位时间内风机轴转动的脉冲数

T ——时间, min

风机实时转速和设定值都显示在显示屏上, 可根据实际作业要求, 实时监测、调整风速。

2.2 多路环状药液均匀喷洒装置

采用圆锥雾喷头, 其喷射角 $\alpha = 60^\circ$ 。在不同的压力下喷雾, 其雾锥角的变化可以忽略不计。无风力辅助喷雾时, 喷头距离靶标 0.5 ~ 1.0 m 为宜, 这

样雾滴既能完全雾化, 又能被输送到靶标^[11~14]。合理风送的情况下, 可以大大提高雾滴的雾化程度和输送距离。所以按照无风力或低速风力辅助情况下计算喷头数 N 。确定喷雾距离 $F = 50 \text{ cm}$, 理论覆盖范围 $D = F \tan \alpha = 28 \text{ cm}$ 。在泵满足压力需求, 喷头距离 E 要满足 $0 < E < 2D$ 。考虑雾滴沉积的均匀性, 取 $E = \frac{D}{2} = 14 \text{ cm}$, 这样喷雾覆盖区互相重叠, 从而获得一个喷雾均匀的效果, 如图 7 所示。

喷头数 N 的计算公式为

$$N = \frac{W}{E} = 15.7 \tag{9}$$

确定多路环状药液均匀喷洒装置的喷头数目为 16 个。靶标覆盖面积为单喷头的 3 倍, 雾滴沉积均匀。

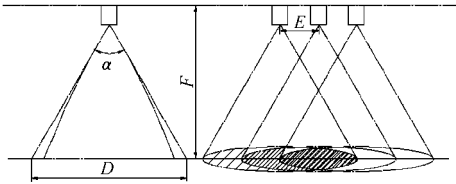


图7 多路环状药液均匀喷洒装置

Fig. 7 Structure of liquid spray device

3 基于 Pro-E 的三维实体设计

运用 Pro-E 软件将喷雾机进行三维建模、装配, 从而检查各个零件的干涉情况。结果表明各部件不存在干涉现象, 结构设计合理。3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机总体装配如图 8 所示。

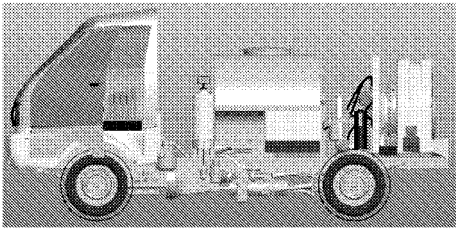


图8 3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机三维总装配

Fig. 8 Assembly drawing of orchard sprayer

4 田间性能试验

4.1 试验地点

2010 年 10 月 15 日在江苏省吴江市无公害绿色食品翠冠梨基地进行喷雾机田间试验。该果园行距 5 m、株距 3 m、平均冠径 1.8 ~ 2.2 m、平均树高 2.8 ~ 3.2 m。

4.2 试验方法

依据 NY/T 992—2006《风送式果园喷雾机 作业质量》及 GB/T 17997—2008《农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定》对 3WZ-700 型自走

式果园风送定向喷雾机进行性能试验。

对果树设定测量点,将树冠沿水平方向选择上、下两个平面,上、下平面的高度根据树冠厚度设定。以中轴线所在的铅垂面 C 、横截面 c 对称左、右分别设竖直面 A 、 a 、 B 、 b 、 D 、 d 、 E 、 e ,水平面和竖直面的交点为测量点。在每一测量点选择 1 片叶子,正、反面放置水敏纸,用于测量雾滴沉积覆盖率,如图 9 所示。

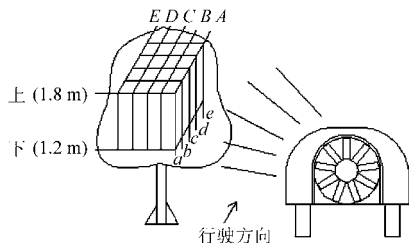


图 9 喷雾机田间试验测量点示意图

Fig. 9 Field experiment of orchard sprayer

4.3 试验结果

3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机在喷雾压力 1.0 MPa、风机转速 1 400 r/min、行驶速度 1.13 m/s 条件下,树膛内部枝叶正面平均有 61.22% 的药液附着率,枝叶反面平均有 20.9% 的药液附着率。叶片反面多细小雾滴附着,附着率

20.90% 时,单位面积雾滴个数平均为 126 个/cm²,满足病虫害防治的雾滴附着个数要求。树冠外层枝叶正面平均有 77.22% 以上的药液附着率,枝叶反面平均有 37.17% 以上的附着率。

每棵树的平均施药量为 0.68 L。对于行株距为 5 m × 3 m 的果园,3WZ-700 型自走式果园风送仿形定向喷雾机作业效率为 1.02 hm²/h (678 棵/h)。

5 结论

(1) 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机采用单动力输出,同时完成喷雾、风送、行走等作业,尺寸小,结构紧凑,满足低矮密植果园的作业要求。

(2) 根据密植果园的风送喷雾作业要求,设计了一种圆环双流道风送雾化装置,通过调节气流方向实现对果树定向喷雾。并确定风机直径为 0.70 m,出风口宽度 0.13 m,提高了喷雾作业效率。

(3) 采用风速自动调控和静液压装置实现风机转速 0 ~ 2 000 r/min 无级变速。

(4) 田间试验证明,机具作业效果良好,树膛内部枝叶正、反面药液附着率分别为 61.22%、20.90%;树膛外部枝叶正、反面药液附着率分别为 77.22%、37.17%。作业效率为 1.02 hm²/h。

参 考 文 献

- 何雄奎,严荷荣,储金字. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):78~80.
He Xiongkui, Yan Herong, Chu Jinyu, et al. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer [J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):78~80. (in Chinese)
- 邱白晶,李坤,沈成杰,等. 连续可变量喷雾系统响应特性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(9):32~35.
Qiu Baijing, Li Kun, Shen Chengjie, et al. Experiment on response characteristics of variable-rate continuous spraying system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):32~35. (in Chinese)
- 宋坚利,何雄奎,曾爱军,等. 三种果园施药机械施药效果研究[J]. 中国农机化,2006(5):79~82.
Song Jianli, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. Spraying quality of three kinds of orchard plant protection equipments [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006(5):79~82. (in Chinese)
- 邱白晶,李会芳,吴春笃,等. 变量喷雾装备及关键技术的探讨[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(2):97~101.
Qiu Baijing, Li Huifang, Wu Chundu, et al. On variable-rate spraying equipment and its key technology [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2004,25(2):97~101. (in Chinese)
- 傅泽田,祁力钧. 国内外农药使用状况及解决农药超量使用问题的途径[J]. 农业工程学报,1998,14(2):7~12.
Fu Zetian, Qi Lijun. Over-use of pesticide and approaches to reduce pesticide dosage [J]. Transactions of the CSAE, 1998,14(2):7~12. (in Chinese)
- 陶雷. 弧型罩盖减少药液雾滴飘失的理论与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
Tao Lei. Theory and trial research on the arc shield in reducing spray drift [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 王万章,洪添胜. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报,2004,20(6):98~101.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(6):98~101. (in Chinese)
- 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)

- conditions [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1):11~14.
- 5 Guzman J L, Rodriguez F, Sanchez-Hermosilla J, et al. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2):715~727.
- 6 胡开群,周舟,祁力钧,等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. 农业机械学报,2010,41(6):70~74.
Hu Kaiqun, Zhou Zhou, Qi Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable-rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):70~74. (in Chinese)
- 7 邓巍,何雄奎,丁为民. 用大喷头脉宽调制间歇喷雾提高沉积率的试验研究[J]. 农业工程学报,2009,25(1):104~108.
Deng Wei, He Xiongkui, Ding Weimin. Experimental study on improving deposition rate using PWM-based intermittent spray from enlarged nozzle[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(1):104~108. (in Chinese)
- 8 邓巍,丁为民. 基于 PWM 技术的连续式变量喷雾装置设计与特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6):77~80.
Deng Wei, Ding Weimin. Variable-rate continuous spray equipment based on PWM technology and its spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):77~80. (in Chinese)
- 9 Bora G C, Schrock M D, Oard D L, et al. Reliability tests of pulse width modulation (PWM) valves for flow rate control of anhydrous ammonia[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005,21(6):955~960.
- 10 Zhu Hang, Lan Yubin, Wu Wenfu, et al. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(3):276~283.
- 11 邹伟,李丽,王秀,等. 基于 PWM 调速的变流量喷药系统[J]. 农机化研究, 2011,33(2):163~166.
Zou Wei, Li Li, Wang Xiu, et al. Variable pesticide spraying system based on PWM speed control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(2):163~166. (in Chinese)
- 12 随顺涛,朱瑞祥,王丽丽. 基于脉宽调制的变量喷药技术控制系统[J]. 农机化研究, 2009,31(4):143~145.
Sui Shuntao, Zhu Ruixiang, Wang Lili. Controlling system based on pulse width modulation for variable spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(4):143~145. (in Chinese)
- 13 Delen R, Clijmans L, Anthonis J, et al. A non-linear model to approximate the dynamics of a pulse width-modulated spray nozzle[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004,65:39~48.
- 14 Lebeau F, Bahir L El, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43:149~161.
- 15 杨莉. 基于 ARM7 的自动变量喷药系统设计与算法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
Yang Li. Design and algorithm research of the auto variable spraying system based on ARM7 [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 16 刘大印,王秀,毛益进,等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统研究[J]. 农机化研究, 2011,33(5):99~103.
Liu Dayin, Wang Xiu, Mao Yijin, et al. Study on PWM variable pesticide spraying control system based on MCU [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5):99~103. (in Chinese)
- 17 李志西,杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京:科技出版社,2010:226~238.
- 18 陈超,李红,袁寿其,等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀性[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6):536~541.
Chen Chao, Li Hong, Yuan Shouqi, et al. Irrigation uniformity of nozzle changeable variable rate sprinkler [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(6):536~541. (in Chinese)

(上接第 30 页)

- 9 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册—机械产品(四)[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 10 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- 11 傅锡敏,吕晓兰,丁为民,等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化,2009(6):10~13,17.
Fu Ximin, Lü Xiaolan, Ding Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009(6):10~13, 17. (in Chinese)
- 12 Hewitt A J. Spray drift: impact of requirements to protect the environment [J]. Crop Protection, 2000,19(8~10):623~627.
- 13 王贵恩. 果树仿形喷雾机理及其关键技术研究[D]. 广州:华南农业大学,2003.
Wang Guen. Profile modeling spray mechanism and its technology foundation for fruit trees [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 14 Holownick R, Doruchowski G, Godyn A, et al. Variation of spray deposit and loss with air-jet directions applied in orchards [J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 77(2):129~136.