

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.027

在线实时混药喷雾系统设计与试验

袁琦堡¹ 胡炼^{1,2} 罗锡文^{1,2} 张盟¹ 周浩¹ 赵润茂¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 在线混药喷施技术具有喷施效率高、用药精准、环境污染小等特点。针对在线混药系统混药比范围小和农药小流量检测难等问题,设计了一种在线实时混药喷雾系统,作业过程中直接将混药注入喷雾泵的入口端实现混药的在线喷雾。设计了一种螺旋蜂孔板式混药器,蜂孔板有左旋和右旋两种,且交替安装。设计了一种碟形混药箱,由混药器流出的水药混合液在混药箱中进一步混合。系统使用精密柱塞泵供药,将药液直接注入喷雾系统;采用基于STM32嵌入式控制器实时检测到的水箱和混药箱的液位信息,通过电磁开关阀控制水的流量;水和药在螺旋蜂孔板式混药器中混合,切向流入碟形混药箱,最终由喷雾泵抽取进行喷施。为实现精准控制,对水箱出口的流量计和底部的压力计进行标定,得到水箱水位和压力计输出电压的关系模型及压力传感器输出电压和流量计之间的变化关系,并对水流量的控制精度进行了试验;对精密柱塞泵的转速与控制信号的脉冲频率以及转速和流量进行了标定,得到了转速与控制信号脉冲频率的变化关系,并对精密柱塞泵的供药精度进行了试验。在精密柱塞泵的工作流量范围内,采用同时对水和药分别进行测量的方法对混药比进行了试验,得到了混药比误差变化曲线。采用毒死蜱作为试验药液,对在线混药系统进行了混药试验,采用岛津液相色谱仪对采样点进行了浓度检测,得到各采样点实际浓度值,并与人工充分混药效果进行了对比。试验表明:混药比为150:1~1000:1时,混药比误差最大为6.75%;水流量平均误差为1.35%,最大误差为7.15%;农药流量平均误差为2%,最大误差为3%;在毒死蜱混药试验中,药水混合液浓度平均误差为11.7%。

关键词: 植保机械; 喷雾; 混药; 在线**中图分类号:** S493 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0176-06

Design and Experiment of Online Mixing Spraying System

Yuan Qibao¹ Hu Lian^{1,2} Luo Xiwen^{1,2} Zhang Meng¹ Zhou Hao¹ Zhao Runmao¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

Abstract: The widely-used online mixing system has a small range of mixture ratio and a detection problem at small flow ratio of pesticide. This paper developed an online-mixing system, which mixed pesticide into carrier directly. A spiral porous mixer, which included left-hand type and right-hand type of the spiral plates, was designed and assembled alternatively. A disk-shaped mixer was proposed to promote the uniformity of the concentration from the spiral porous mixer. This system consisted of a precise plunger pump to deliver the pesticide, an embedded controller based on STM32 to detect the water level in the tank, a disk-shaped mixer, and an electro-magnetic switch valve to provide a certain outflow of water. The water and pesticide were mixed in the spiral porous mixer, then flowed into the disc-shaped mixer, and sprayed on the crops by the spray pump. The pressure sensor was calibrated with

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0200704)、广东省省级科技计划项目(2015B020206002)和中国科协青年人才托举工程项目(2015)**作者简介:** 袁琦堡(1985—),男,博士生,主要从事高地隙喷雾机研究,E-mail: yqb0929@163.com**通信作者:** 胡炼(1984—),男,副研究员,主要从事农业机械与装备设计、智能检测与控制技术研究,E-mail: lianhu@scau.edu.cn

the water level in the water tank, the flowmeter was calibrated with the pressure sensor, and used to test the error. The pulse frequency driving the plunger pump was calibrated with the rotate speed, and used to test the outflow error of pesticide. In the range of the work flow, the flow of the water and the flow of the pesticide were measured at the same time. Using chlorpyrifos as the target pesticide, the sampling points of the mixture concentration were measured by a liquid mass spectra. The actual density of the sampling points was obtained, and a comparison experiment with the artificial full mixing of the pesticide and the water was carried out. The experiment results showed that working at the mixture ratio of 150:1 ~ 1 000:1, the average flow error of water was 1.35%, the maximum error was 7.15%; the average flow error of pesticide was 2%; the maximum error was 3%; the maximum error of the mixture ratio was 6.75%. After a test of mixing using chlorpyrifos, the average error of the mixture concentrations was 11.7%.

Key words: plant protection machinery; sprayer; mixture; online

引言

传统的喷雾机械普遍采用人工预混药方式,这种方式需直接与药液接触,对作业人员危害较大,且存在农药用量大、环境污染严重等问题^[1]。为提高喷施作业安全性、环保性和精确性,并获得稳定高效的病虫草害防治效果,国内外开展了在线混药喷雾技术的研究。在线混药的特点是水和药液通过在线混药装置按照一定的比例实时混合,甚至可以实时调节混药比和喷雾量,根据病虫草害情况进行精确对靶喷施^[2-3]。刘志壮等^[4]研制了一种压差式液体流量计,实现了 12 ~ 360 mL/min 范围的药液流量检测。邱白晶等^[5-7]利用 CFD 仿真技术研究了射流混药装置结构参数对混药均匀性的影响。李晋阳等^[8]提出了一种提高适应水药混合比在 300:1 ~ 500:1 范围内的混药浓度稳态精度的方法,通过动态调整控制器参数来提高混药浓度的稳态控制精度,但未见试验效果报道。

为满足多种农作物及其不同生长阶段的防治要求,在线混药装置需具有较大范围的水药混合比。根据农药手册^[9],水药混药比常用范围为 150:1 ~ 2 000:1,水稻常用农药的水药混合比为 250:1 ~ 1 000:1。目前,混药装置多为射流混药器和螺旋叶片式静态混药器,前者的结构形式主要依据经验设计,结构固定,难以实现混药比的较大范围调节,而且混药均匀性和控制精度较差;后者较成熟,应用广泛,混药效果主要取决于混药器的长度^[10-11]。本文的在线实时混药喷雾系统采用直接注入式在线混药技术,将药液直接注入到喷雾系统中。直接注入式混药系统按照注入的位置不同可以分为喷雾泵入口端注药方式、喷雾泵出口端注药方式以及喷嘴处注药方式。为了达到一定的喷雾效果,喷雾泵出口端的喷雾压力可达 4 MPa 以上,喷雾泵出口端注药方式的高压精确注药难度较大。喷嘴处注药方式可有

效地提高混药的滞后时间,但难于解决混药均匀性问题^[10-12]。为保证混药均匀性,本文采用喷雾泵入口端注入的方式,药液注入点压力较稳定,对药液注入精度的影响较小,有利于药液的精确注入。

本文针对水田高地隙喷雾机设计一种采用喷雾泵入口端注药方式的在线实时混药喷雾系统,分析系统组成及控制流程,建立药流量模型和水流量模型,并进行混药性能试验。

1 在线实时混药喷雾系统

1.1 系统组成

采用喷雾泵入口端注入方式的在线实时混药喷雾系统如图 1 所示,系统包括供药部分、供水部分、混药部分、喷施部分和控制部分。供药部分包括药箱和精量柱塞泵,供水部分包括水箱和电磁开关阀,混药部分包括螺旋蜂孔板式混药器和碟形混药箱,喷施部分包括喷雾泵、压力调节模块和喷头组。控制部分包括基于 STM32 的嵌入式控制器、流量计、压力传感器 I 和压力传感器 II、液位开关 I 和液位

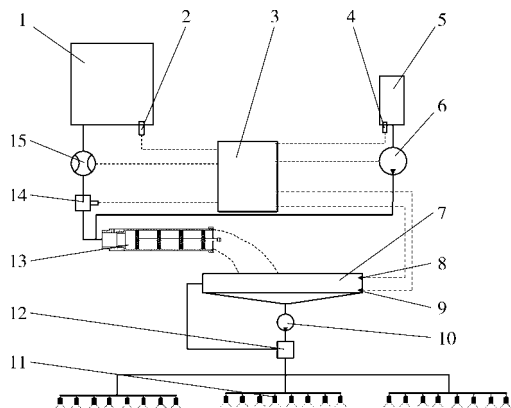


图 1 在线混药喷雾系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of online mixing spraying system

1. 水箱 2. 压力传感器 I 3. 控制器 4. 压力传感器 II 5. 药箱 6. 精量柱塞泵 7. 碟形混药箱 8. 液位开关 I 9. 液位开关 II 10. 喷雾泵 11. 喷头组 12. 压力调节模块 13. 螺旋蜂孔板式混药器 14. 电磁开关阀 15. 流量计

开关 II 等检测元件,以及电磁开关阀和精量柱塞泵等执行元件。系统实物图如图 2 所示。

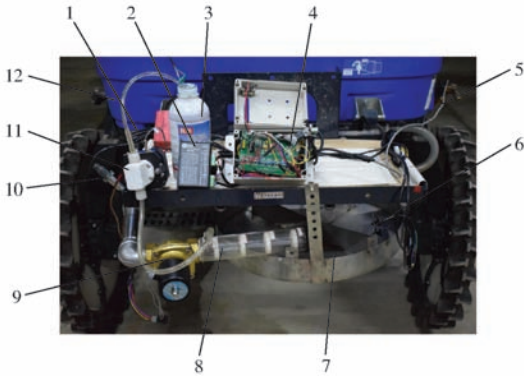


图 2 在线混药喷雾系统实物图

Fig. 2 Online mixing spraying system

- 1. 霍尔传感器 2. 步进电动机驱动器 3. 农药瓶 4. 控制板
- 5. 压力传感器 6. 液位开关 7. 碟形混药箱 8. 螺旋蜂孔板式混药器
- 9. 电磁开关阀 10. 流量计 11. 精量柱塞泵 12. 水箱

1.2 混药器设计

设计的螺旋蜂孔板式混药器结构如图 3 所示。混药器的水注入口接水箱,药液注入口接精量柱塞泵,水药混合液出口位于碟形混药箱上方,混合液切向流入碟形混药箱,如图 1 所示。混药管中的螺旋蜂孔板具有左旋和右旋 2 种,如图 4 所示,2 种螺旋蜂孔板交替安装,水和药在板间实现自旋转混合。

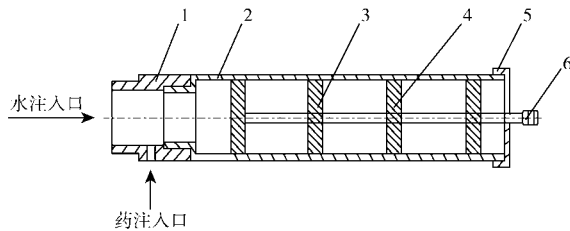


图 3 混药器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of mixture

- 1. 注药管 2. 混药管 3. 螺旋蜂孔板(左旋) 4. 螺旋蜂孔板(右旋)
- 5. 调节杆 6. 定位圈

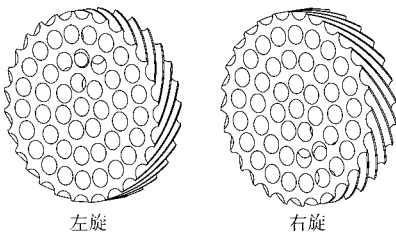


图 4 螺旋蜂孔板

Fig. 4 Spiral porous plates (left-hand and right-hand)

1.3 在线混药喷雾控制系统

在线混药喷雾控制系统采用基于 STM32 的嵌入式系统,如图 5 所示。实物图如图 6 所示。

在线混药喷雾控制采用自动闭环系统,如图 7

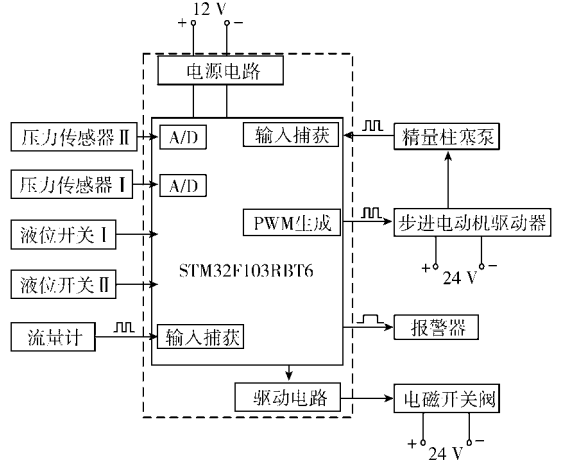


图 5 控制系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of control system

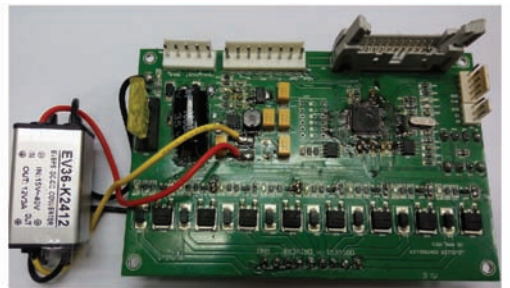


图 6 控制系统实物图

Fig. 6 Photo of control system

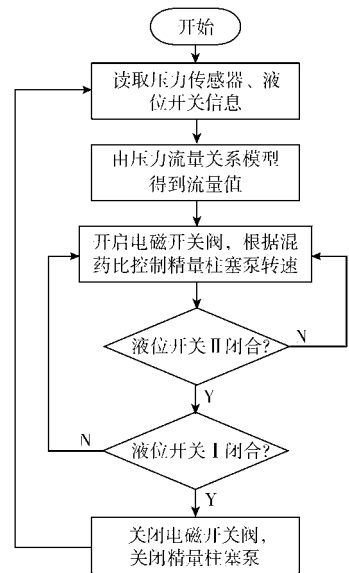


图 7 控制流程图

Fig. 7 Controlling flow chart

所示。具体工作流程如下:

(1) 在线实时混药喷雾系统的控制器通过压力传感器 I 实时采集水箱内的水位信息,由流量和压力的关系模型计算得到电磁开关阀打开时水的流量。

(2) 根据当前水箱中水的流量和用户设定的药水混合比,以及精量柱塞泵的转速与控制脉冲频率

关系模型,计算出精量柱塞泵的驱动输出。

(3)利用液位开关 I 和液位开关 II 检测碟形混药箱中的液位信号。

(4)当碟形混药箱中液位开关 II 检测到最低液位信号时,控制器同时开启电磁开关阀和精量柱塞泵,向混药器注入一定流量的水和药,碟形混药箱内液位上升。

(5)当碟形混药箱中液位开关 I 检测到最高液位信号时,控制器同时关闭电磁开关阀和精量柱塞泵,停止向碟形混药器注入水和药。

(6)作业过程中,喷雾泵始终从混药箱中抽取混合均匀的药水混合液,通过喷施部分进行喷施。

(7)压力传感器 II 检测药箱中药液的液位信息,当药液将尽,报警器发出提示信号。

2 试验与分析

2.1 试验材料

在线实时混药装置采用井关 JKB18C 型高地隙喷雾机作为试验平台。喷施作业使用喷雾机自带的喷雾泵,喷雾压力 1~4 MPa,喷雾流量最大 40 L/min。药泵使用成都泰锐晟科技有限公司的 57A 微型陶瓷计量柱塞泵,采用步进电动机驱动,控制精度小于 0.5% 时,对农药有较好的防腐蚀性能。试验农药采用有效成分为 45% 的毒死蜱,剂型为乳油。农药含量检测采用岛津液相色谱仪 LC-15C,检测波长精度为 ± 1 nm。传感器标定采用安捷伦 U2331A 型数据采集卡,分辨率为 16 位,采样率为 1 MSa/s。水和药的质量称量使用精量电子秤,精度为 1%。计时采用秒表,精度为 1 ms。

2.2 精量柱塞泵的药液流量分析

在工作转速 0~450 r/min 内,取 9 个试验转速,为 58、100、150、200、250、300、350、400、450 r/min。在各转速下分别对精量柱塞泵的出流质量进行测量,计时 10 s,计算得到精量柱塞泵工作转速与流量的变化关系,如图 8 所示,精量柱塞泵的流量与转速存在良好的线性关系, R^2 为 0.9999。

根据得到的精量柱塞泵的转速和流量的关系模型,采取与上述同样的 9 个转速,进行 3 次单因素重复试验,得到精量柱塞泵各试验转速下实际流量相对于拟合方程理论流量的平均误差曲线,如图 9 所示。实际流量相对于拟合方程理论流量的平均误差为 2%,最大误差为 3%;误差随着精量柱塞泵的流量增大而减小,这是由于流量越大,精量柱塞泵的转速越大,柱塞的脉动性对流量的影响越小,流量越稳定。

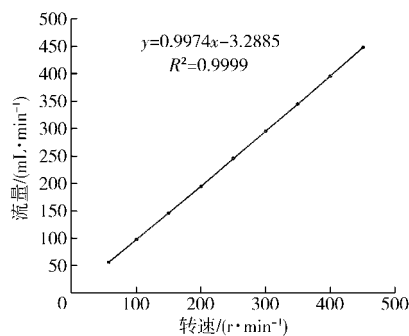


图 8 柱塞泵的流量标定曲线

Fig. 8 Clibration curve of plunger pump flow

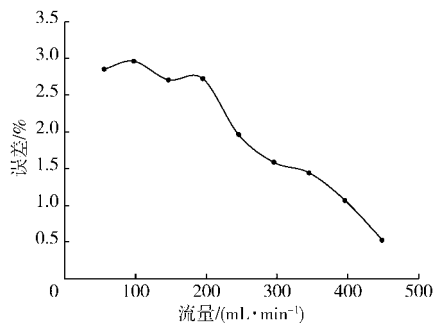


图 9 柱塞泵流量平均误差曲线

Fig. 9 Average error of plunger pump flow

2.3 水箱流出流量分析

水箱水位高度信号采用压力传感器 I 检测,采用安捷伦 U2331A 型数据采集卡在不同水位高度下采集传感器的输出电压,得到压力传感器 I 的输出电压和水箱水位的变化关系,如图 10 所示,压力传感器输出电压与水面高度有良好的线性关系, R^2 为 1。

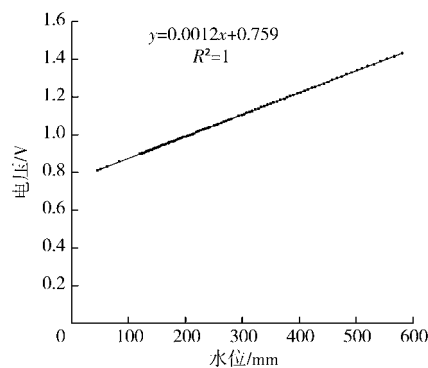


图 10 压力传感器 I 的标定曲线

Fig. 10 Clibration curve of pressure sensor I

在水箱出口处收集该水位时流出水的流量,得到压力传感器输出电压与流量之间的关系曲线,如图 11 所示,压力传感器输出电压与流量之间具有良好的线性关系,拟合方程的 R^2 为 0.984。

对拟合方程进行验证试验,得到水流量的平均误差为 1.35%,最大误差为 7.15%。

2.4 混药比控制性能分析

不同作物、不同生长周期喷施的配方差异大,高适应性的混药系统应具备较大的水药混合比例范

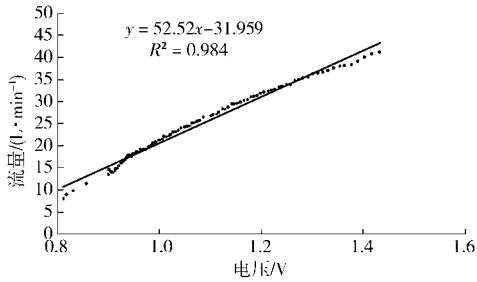


图 11 水的流量标定曲线

Fig. 11 Calibration curve of water flow

围^[13-24]。通过分别测量一定时间内在线实时混药系统精密柱塞泵泵出的药液质量和水箱流出的水质量,分析系统在混药比 150:1 ~ 1 000:1 范围内控制适应性和误差等性能。

水的流量为 40 L/min,选取水药混合比 150:1、500:1、700:1、1 000:1 进行单因素试验。每个混药比做 3 次重复试验。用 2 个容器同时分别接取精密柱塞泵和电磁开关阀排出的清水,计时 10 s。然后用精密电子秤分别进行称量,计算得到各个混药比下的水和药实际混合比,得到各个混药比的平均误差,如图 12 所示。

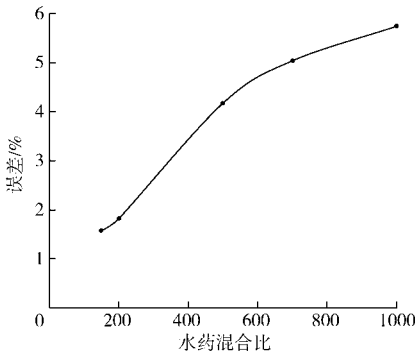


图 12 混药比的平均误差曲线

Fig. 12 Average error of mixture ratio

在试验混药比 150:1 ~ 1 000:1 范围内,混药比小于 700:1 时的误差小于 5%,混药比为 1 000:1 时的误差为 6.75%。误差随着混药比的增加而增大,这是由于混药比越大,精密柱塞泵的转速越小,脉动性对流量的影响越明显。

2.5 在线混药效果试验

采用有效成分为 45% 的毒死蜱作为试验药液,用系统自动混药方式对在线混药系统进行浓度试验,并在同样条件下用人工充分混药方式进行了对比试验。试验混药比为 300:1,水流量为 40 L/min。

用精密柱塞泵向蜂孔板式混药器的供药口供给

相应流量的药液,采用人工操作方式对电磁开关阀进行控制,待管路上充满药液后,再进行混合液的收集。在喷杆的左、中、右各一个喷头处,以及碟形混药器的出口处进行采样,共 4 个采样点。开始收集时,同时将烧杯放在相应的采样点收集混合液,计时 10 s,重复进行 3 次。同样的试验条件下,按照要求的混药比人工充分混合代替系统自动混药,同样对 4 个采样点进行样品采集。用 LC-15C 型岛津液相仪对试验样品进行浓度检测,得到各采样点的水药混合比,如图 13 所示。

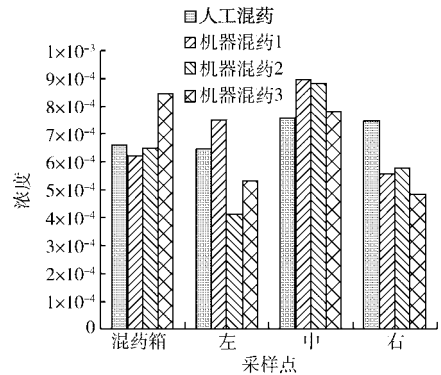


图 13 各测量点质量分数

Fig. 13 Concentration of measurement points

由图可知,与人工混药相比,用在线混药系统混药后的浓度与人工混药的平均误差为 11.7%^[12]。主要是因为所采用的农药为乳油剂型,水溶性较差,浓度测量过程中缓慢沉淀,给准确测量带来了难度;另外,混药器只采用了 4 个螺旋蜂孔式混药板,数量较少,混药管长度只有 240 mm,混药管较短。

3 结论

(1)设计的在线实时混药喷雾系统能够实现自动作业;水的流量平均误差为 1.35%,最大误差为 7.15%;精密柱塞泵流量的平均误差为 2%,最大误差为 3%。

(2)混药比试验结果表明,混药比范围为 150:1 ~ 1 000:1;随水药混合比增大,脉动越大,误差也越大,混药比 700:1 以内的误差小于 5%,1 000:1 时的平均误差为 6.75%。

(3)采用蜂孔板式混药器和碟形混药箱相结合的方式,与人工混药相比,混药浓度平均误差为 11.7%。需进一步对混药器进行深入研究,以达到更好的混药效果。

参 考 文 献

- 魏新华,蒋杉. 农药变量喷施技术的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2011(2): 9-14.
WEI Xinhua, JIANG Shan. The research status and development trend of pesticide variable-rate spray technique [J]. Journal of

- Agricultural Mechanization Research, 2011(2): 9-14. (in Chinese)
- 2 陈志刚,朱树礼,邱白晶. 在线射流混药浓度控制系统[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 442-445.
CHEN Zhigang, ZHU Shuli, QIU Baijing. Online jet mixing control system of pesticide concentration [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 442-445. (in Chinese)
 - 3 蔡祥, WALGENBACH Martin, DOERPMUND Malte, 等. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 69-72.
CAI Xiang, WALGENBACH Martin, DOERPMUND Malte, et al. Direct nozzle injection sprayer based on electromagnetic-force valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 69-72. (in Chinese)
 - 4 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等. 在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 93-96.
LIU Zhizhuang, XU Hanhong, HONG Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 93-96. (in Chinese)
 - 5 邱白晶,徐溪超,邓斌,等. 射流混药装置面积比对混药均匀性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 95-100.
QIU Baijing, XU Xichao, DENG Bin, et al. Effect of area ratio on mixing homogeneity in jet-mixing apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 95-100. (in Chinese)
 - 6 邱白晶,徐溪超. 射流混药装置二维和三维流场对比分析[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5): 95-100.
QIU Baijing, XU Xichao. Contrast and analysis between 2D and 3D flow field of jet-mixing apparatus [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(5): 95-100. (in Chinese)
 - 7 欧鸣雄,贾卫东,邱白晶,等. 射流混药装置变工况流场特性的试验与数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 95-100.
OU Mingxiong, JIA Weidong, QIU Baijing, et al. Experiment and numerical analysis of flow field of jet mixing under different conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 95-100. (in Chinese)
 - 8 李晋阳,魏新华. 一种提高混药装置混药浓度稳态精度的实时控制方法:中国,201410378184.5[P]. 2014-08-01.
 - 9 王忠. 新编常用安全农药使用手册[M]. 北京:中国农业出版社, 1997:21-67.
 - 10 郭宇波,何雄奎,宋坚利,等. 静态混合器在自动混药装置中的应用[J]. 农机化研究, 2008(2): 147-149.
GUO Yubo, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Application of static state blender in auto mix pesticide equipment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(2): 147-149. (in Chinese)
 - 11 付大平. 静态翼片式植保机械混药器试验研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2013.
FU Daping. Experimental study on static blade mixer for plant protection machinery [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013. (in Chinese)
 - 12 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)
 - 13 王锦江,孙星,严荷荣,等. 注入式变量施药控制系统设计[J]. 农机化研究, 2013(9): 129-132.
WANG Jinjiang, SUN Xing, YAN Herong, et al. Control system design of injection variable rate spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(9): 129-132. (in Chinese)
 - 14 刘雪美,李扬,李明,等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 37-44. (in Chinese)
 - 15 陈长林,龚艳. 基于两级射流泵混药装置的喷雾机应用试验研究[J]. 中国农机化, 2007(4): 72-74.
CHEN Changlin, GONG Yan. Experimental performance of a mixing apparatus based on two-stage injection pump to sprayers [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2007(4): 72-74. (in Chinese)
 - 16 赵德菱,邵孝侯. 母液比重对射流式混药器吸入性能影响的试验研究[J]. 中国农机化, 2010(6): 58-60.
ZHAO Deling, SHAO Xiaohou. The simulated study of sprayer mixture density effect on jet type mixer [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010(6): 58-60. (in Chinese)
 - 17 邓斌,邱白晶,何耀杰,等. 喷杆喷雾机射流混药装置试验研究[J]. 农机化研究, 2014(5): 170-172.
DENG Bin, QIU Baijing, HE Yaojie, et al. The test method for water consumption of vegetable washing machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(5): 170-172. (in Chinese)
 - 18 邱白晶,邓斌. 一种自动混药的变量喷雾装置:中国,201320285621.X[P]. 2013-05-23.
 - 19 洪添胜,刘志壮,李震. 一种变量喷雾自动混药装置:中国,200820047364.7[P]. 2008-05-06.
 - 20 徐幼林,郭敬坤,郑加强. 农药在线混合均匀度高速摄影分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 75-79.
XU Youlin, GUO Jingkun, ZHENG Jiaqiang. Mixing uniformity of chemical and water in direct injection system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 75-79. (in Chinese)
 - 21 徐幼林. 植保机械混药器及其农药在线混合性能研究[D]. 南京:南京林业大学, 2009.
XU Youlin. The research of the plant-protection mixer and online-mixing performance [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese)
 - 22 倪涛. 农药在线混合可变量控制系统研究[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
NI Tao. Study on control system design of variable rate in-line pesticide mixing [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013. (in Chinese)
 - 23 SUN H, BAI B, YAN J, et al. Single-jet spray mixing with a confined cross flow [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21(1): 14-24.
 - 24 XU Y, ZHOU F, GUO J, et al. Flow field simulation of chemical mixing process for direct injection system based on CFD[C]// 2008 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 083604, 2008.