DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.009

无人直升机远程控制喷雾系统*

茹　煜　贾志成　范庆妮　车　军
（南京林业大学机械电子工程学院，南京 210037）

【摘要】 设计了基于德国 VARIO 公司的多用途无人机的远程控制低量喷雾系统。在无人机上搭载了包括药箱、控制箱、液泵、管路系统、悬臂装置和雾化喷头的喷雾系统，并设计了专用于无人机喷雾的远程控制系统，通过地面远程遥控控制喷雾系统的施药工作。对影响离心雾化喷雾效果主要因素进行理论研究和性能试验，获得了雾化盘直径为 80 mm 的离心雾化喷头的最佳作业参数，即雾化盘转速为 6 000 r/min、喷雾量为 48 L/h，雾滴的体积中径为 138.558 μm 和喷幅为 3.42 m。

关键词：无人机　喷雾系统　远程控制　离心雾化
中图分类号：S252⁺.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2012)06-0047-06

Remote Control Spraying System Based on Unmanned Helicopter

Ru Yu　Jia Zhicheng　Fan Qingni　Che Jun
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forest University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract

The remote control spray system based on the helicopter from German VARIO company was designed. The spray system including the tank, control box, pump, pipeline system, cantilever and centrifugal nozzle were set on un-manned helicopter. The remote control system reserved for aerial spraying was developed. The spraying system can be operated by remote control units. By carrying out the theory research on main influence facts of centrifugal atomizing spray effect and the tests for nozzle performance, the optimal operating parameters of centrifugal atomizing nozzle were obtained, that is, rotary speed of 6 000 r/min, flow rate of 48 L/h, VMD of 138.558 μm, and spray swath of 3.42 m.

Key words　Unmanned helicopter, Spray system, Remote control, Centrifugal atomizing

引言

我国历年病虫草害防治面积中水稻田约占 34%，占总防治量的三分之一[1]。长期以来，水稻的病虫草害防治主要依靠人力使用手动喷雾器和背负式机动喷雾机进行，不仅劳动强度大、作业质量差、作业效率低，难以适应迅速有效控制暴发性重大病虫草害的要求，也已成为制约实现水稻全程机械化目标的主要技术瓶颈。无人驾驶小型直升机具有作业高度低、飘移少、可空中悬停、无需专用起降机场，旋翼产生的向下气流有助于增加雾流对作物的穿透性、防治效果高、远距离遥控操作，喷洒作业人员避免了暴露于农药的危险，提高了喷洒作业安全性等诸多优点[2~4]，以其作为施药装备载体的超低空低量航空喷施技术已成为农药喷洒技术的研究热点之一。

本文采用德国 VARIO 公司的多用途无人直升机的远程控制航空喷雾系统，开发适应低空、低量航空喷洒技术雾化器件并开展相关性能参数试验研究，为采用超低空、低量航空喷施技术实现水稻病虫害防治的关键问题提供技术与装备支撑。

收稿日期：2011－07－04　修回日期：2011－10－18
* 国家林业公益性行业科研专项经费资助项目(200904051)、江苏省研究生培养创新工程资助项目(CXZZ11_0513)和校创新基金资助项目(163040043)
作者简介：茹煜，副教授，博士，主要从事植保机械研究，E-mail：superchry@163.com

1 远程控制航空喷雾系统

无人机远程控制航空喷雾系统由航空喷雾系统和远程控制系统组成,其工作原理如图 1 所示。工作时,由地面操控人员将直升机操控至指定作业地点及指定高度,在操控直升机沿着水平直线向前飞行的同时,可以通过遥控器相应操作钮远程调控电液开关控制器,即可调节农药喷洒量。当需要终止农药喷洒时,关闭遥控器上与农药喷洒相对应的开关即可。此时,农药输送管路先行关闭其后喷头电动机电源关闭以避免药液滴漏。当作业完毕或直升机药液用完时,由地面操控人员操控直升机飞回指定地点。

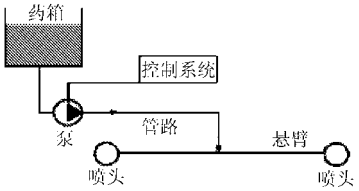

图 1 无人机喷雾原理

Fig. 1 UAV-based spraying

1.1 航空喷雾系统

航空喷雾系统要在相同的施药效果之下尽可能提高无人机的载药量,从而提高效率、降低成本。在德国 VARIO 公司的多用途无人直升机的有限空间和固定最大载荷内设计搭载的喷雾系统,包括药箱、控制箱、液泵、管路系统、悬臂装置和雾化喷头等主要部件[5]。该系统需要在有限空间内合理安排每个部件的位置,并尽可能降低系统质量以运载更多的药剂,提高最终的工作效率。

图 2 为无人机喷雾系统。该系统中有一个专用药箱(450 mm × 290 mm,容积 13 L),置于无人机中央位置相对下部,通过固定架固定在起落架上。固定架的上方装有液泵和控制箱,来自药箱的液体在液泵的作用下经过一个三通阀顺着药液软管被输送到两端的喷头中。喷头通过螺栓固定在两侧悬臂(总长 1 750 mm)的末端。控制箱通过接收来自远程遥控器的信号,控制液泵的启、闭和离心雾化喷头直流电动机的通、断,从而控制旋翼两侧喷雾装置的工作。

1.2 远程控制系统

远程控制系统通过操作地面发射端,实现远程控制无人机中无线接收模块内继电器的通、断。图 3 为远程控制系统应用原理图。将无线控制的接收模块接入到无人机的喷雾系统的控制箱中,即可实现远程对泵与喷头电动机的控制。无人机起飞前,先在地面闭合开关 S,系统进入待命状态。在

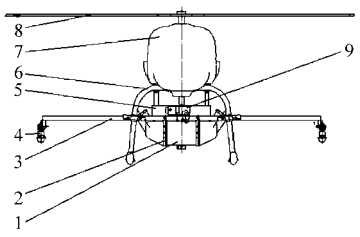

图 2 无人机喷雾系统

Fig. 2 UAV-based spraying system

1. 药箱 2. 固定架 3. 悬臂 4. 离心雾化喷头 5. 控制箱 6. 起落架 7. 无人机主体 8. 旋翼 9. 液泵

无人机进入预定施药区域后,远程控制接收模块中的继电器导通,泵与喷头内的电动机工作,喷雾系统施药。

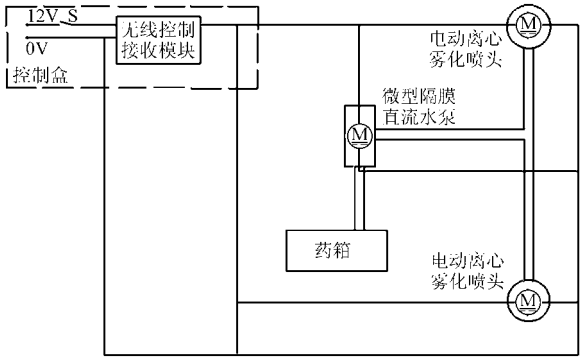

图 3 远程控制系统应用原理图

Fig. 3 Application principle of long-distance control system

发射模块为 315 M 无线电发射模块,其工作频率为 315 MHz,采用声表谐振器 SAW 稳频,频率稳定度极高,为 ±75 kHz。当环境温度在 -25 ~ 85℃之间变化时,频飘仅为 945 Hz/℃。工作电压为 DC 3 ~ 12 V。接收模块为 315M 超再生接收模块,具有电路简单、灵敏度高、体积小、成本低、抗干扰能力较强、模块自身辐射极小的特点[6]。

图 4 为发射电路原理。其中,315 M 发射模块采用 ASK 方式调制[7]。当数据信号停止时发射电流降为零。没有按下按钮时,三极管 Q1 截止,编码集成芯片 PT2262 处于断电状态,无线数据发射模块不发射信号。当按钮 S1 或 S2 任一个被按下时,三极管 Q1 导通,编码集成芯片 PT2262 开始工作,它根据数据输入端 D0 ~ D3 的电平进行编码,由地址码、数据码、同步码组成一个完整的码字。该编码信号经 315 M 无线数据发射模块进行调制后经天线发射到周围的空间。如果按钮一直按住则发射模块连续发射无线信号。当编码集成芯片 PT2262 的第 17 引脚为低电平期间,315 MHz 的高频发射模块停止振荡,所以高频发射电路完全受控于 PT2262 的 17 脚输出的数字信号,从而对高频电路完成幅度键控(ASK 调制)相当于调制度为 100% 的调幅。

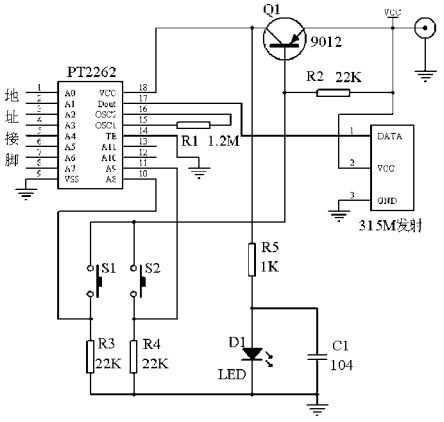

图 4　发射电路原理图

Fig. 4　Principle of emit circuit

图 5 为接收电路原理。利用 315 M 超再生接收模块和解码集成芯片 PT2272 - M4 并配合使用 D 触发器 4013 和继电器[8]，形成对应于上述发射模块的远程控制系统接受部分电路。当无线接收模块没有接收到空间的 315 MHz 信号时，输出的只是干扰信号，解码集成 PT2272 - M4 输出端 D0 ~ D3 均为低电平。当无线接收模块收到空间的 315 MHz 信号时，经放大、变频、滤波等处理后输出控制信号，送到解码集成芯片 PT2272 的第 14 脚 DIN 中进行解码。只有 PT2272 的地址端的电平状态与发射部分的 PT 2262 的地址端一致时，对应的数据端才有高电平输出。当接收到发射部分发来的信号时，对应高电平处会产生一段电平的上升沿。由 D 触发器 4013 构成的双稳态电路，当输入端 CK 为上升沿时输出端 Q 翻转，输出的电平通过控制继电器的断通，从而控制用电器的工作状态。

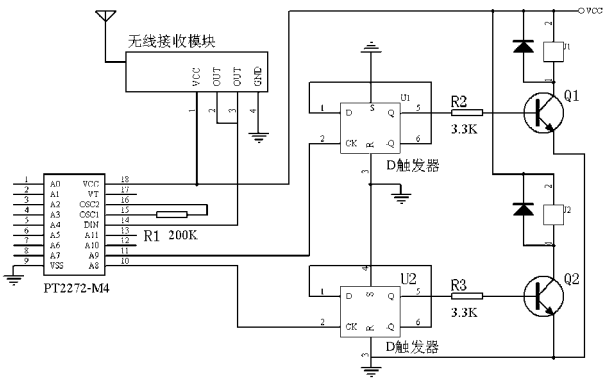

图 5　接收电路原理图

Fig. 5　Principle of receive circuit

2　离心雾化装置

2.1　离心雾化装置

雾化喷头是喷雾系统中最主要的装置，对最终的喷雾效果有着相当大的影响。基于小型无人机的远程控制航空喷雾系统，由于其机身大小和载重的限制很难安装太多喷头。本文设计了喷洒面积相对较广、施药均匀、喷洒效率高的离心雾化喷头，如图 6 所示。离心雾化喷头由导柱、螺套、喷头座、罩壳、流量器、雾化盘、直流电动机和螺钉等组成[9]。喷头座、罩壳用聚丙烯制成。喷头固定在喷杆上，塑料输药管穿过喷杆与喷头的流量器连接，将药箱中的药液送入喷头。流量计呈长锥形管状，伸向雾化盘，用来输送药液和控制药液流量。直流电动机利用飞机自带电源为雾化盘提供动力，雾化盘呈圆台盆状，内壁设有多个细槽，供药液均匀分布，实现超低量喷雾。

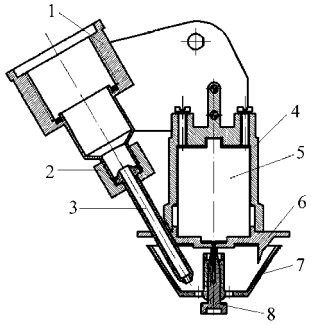

图 6　离心雾化喷头

Fig. 6　Centrifugal atomized nozzle

1. 导柱　2. 螺套　3. 流量器　4. 罩壳　5. 直流电动机　6. 喷头座　7. 雾化盘　8. 螺钉

2.2　影响离心雾化喷雾效果的主要因素

喷雾效果与雾滴运动速度（即速度场）、雾滴粒径、喷幅等喷雾特性有关[10]。

2.2.1　雾滴运动速度

假设流体为不可压缩的水（水的密度 $\rho = 1 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$），不考虑流体热能、内能和势能的变化，由单位质量流的伯努利方程可推导得雾滴离开雾化盘的速度为

$$v_2 = \sqrt{2\rho(p_1 - p_2) + v_1^2 + \omega^2(r_2^2 - r_1^2)} \qquad (1)$$

式中　p_1——导管出口处液体压力，Pa

p_2——雾化盘边缘雾滴离开点液体压力，Pa

v_1——液体流出导管时流速，m/s

ω——雾化盘角速度（由直流电动机转速控制），rad/s

r_1——雾化盘轴半径，m

r_2——雾化盘半径，m

由于液体导入管出口处液体压力与大气压力之差很小，即 $p_1 - p_2$ 可以忽略。此外，$v_1 \ll v_2$，$r_1^2 \ll r_2^2$，可忽略 v_1、r_1。则式(1)可写成

$$v_2 = \omega r_2 \qquad (2)$$

从式(2)中可以看出，雾化盘式离心雾化产生的雾滴速度可近似等于它的切向速度，其径向速度分量可以忽略不计，它的速度与转盘直径和直流电

动机转速有关。在直流电动机转速一定时,雾滴速度与雾化盘半径呈正比;在雾化盘直径一定时,雾滴速度与直流电动机转速呈正比。

2.2.2 雾滴粒径

以液丝形成雾滴方式分析影响雾化盘式离心雾化粒径的主要因素,根据照片曝光测出的雾滴轨迹来计算液丝分布频带[11],再利用无量纲因子可得

$$d^{2.27}=\frac{4.15Q\sigma^{0.34}\mu^{0.04}}{D^{1.82}\omega^{1.70}\rho^{0.86}} \tag{3}$$

式中 D——雾化盘直径,m

μ——液体动力粘度,m^2/s

σ——液体表面张力,N/m

d——雾滴粒径,μm

Q——喷雾流量,m^3/s

由式(3)可知,当药液一定时(即ρ、μ、σ一定),雾化盘式离心雾化的雾滴粒径与喷雾量、直流电动机转速以及雾化盘直径有关。

2.2.3 喷幅

当雾化盘式离心雾化器与地面的高度一定时,喷幅与雾滴初速度和转盘直径有关。由于转盘直径的变化范围有限,所以影响喷幅的主要因素还是雾滴的初速度,而雾滴的初速度与雾化盘的角速度和喷雾流量(或喷雾压力)有关。雾滴的初速度越高,雾滴飞行的距离越远,但由于雾滴初速度越高,产生的雾滴越小,克服空气阻力的惯性也小,又限制了雾滴飞行的距离。所以,对于雾化盘式离心雾化,喷幅在一定范围内随着雾化盘角速度有先增后减的趋势;随着喷雾流量的增大有增大的趋势。

2.3 离心雾化性能试验

通过上述分析可知,影响离心雾化效果的主要因素是雾化盘直径、雾化盘转速和喷雾流量。雾化盘直径根据资料设计为 80 mm,本文通过改变雾化盘转速和流量,从喷幅、雾滴粒径、雾滴速度场等角度对离心雾化喷头的性能进行测试[12~13],确定适合该小型无人机低空、低量喷洒的最佳喷雾参数。

2.3.1 喷幅

喷幅测试采用高速摄影测试系统[14],试验结果如图 7 所示。在同一高度位置处测量时,雾化盘的转速越高,喷幅则越小;当雾化盘转速为 4 000、5 000、7 000 r/min 时,喷幅随着喷雾量的变化呈现弧线;在雾化盘转速为3 000、6 000、8 000 r/min 时,喷幅随着喷雾量的变化呈现锯齿形。雾化盘转速为 3 000、6 000 r/min 条件下,最大喷幅出现在流量为 54 L/h时,分别为 4.03 m 和 3.54 m;雾化盘转速为 8 000 r/min条件下,最大喷幅出现在流量为 60 L/h 时,为 2.99 m。

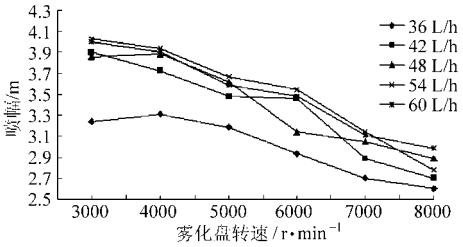

图 7 不同流量时喷幅与雾化盘转速关系曲线

Fig. 7 Spraying swath test results

2.3.2 雾滴体积中径

雾滴粒径测试装置采用激光粒度仪,试验结果如图 8 所示。在测量位置不变的情况下,当流量相同时雾滴体积中径随着雾化盘转速的增加而减小,且近似呈线性关系;在雾化盘转速一定时雾滴体积中径随流量的增加而增大。当雾化盘转速为 3 000 r/min、流量为 54 L/h 和 60 L/h 时,无法测得雾滴粒径信息,显示雾滴浓度太小,主要原因也是雾化盘转速太低而且流量太大,导致雾化效果比较差。在小型无人机低空低量喷洒中可以选用不同流量下的不同雾化盘转速,获得不同的雾滴体积中径,以满足小型无人直升机低空低量喷洒要求。

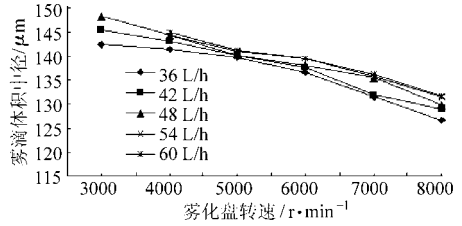

图 8 不同流量时雾滴体积中径与雾化盘转速关系曲线

Fig. 8 VMD test results

2.3.3 雾滴速度场

雾滴速度场采用 PIV 测试系统[15],试验结果如图 9 所示。由于 CCD 相机的视野范围有限,离心雾化装置产生的雾滴覆盖面积比较广,所以在图像捕捉过程中,只获取穿过喷头轴线的对称平面的一半来分析,图 9 只显示了流量为 48 L/h 时,在不同雾化盘转速下的雾滴速度场。

随着雾化盘转速的增加,雾滴的最大速度不断增大,而且最大速度发生在雾化盘的出口附近。主要原因是雾化盘转速增加,雾滴获得的初动能增大,其离开雾化盘时的速度增大,在具有较大初动能的雾滴离开雾化盘以后,在下落过程中与周围空气发生汽液两相掺混,液相动量逐渐衰减,雾滴速度逐渐减小,汽液两相掺混的强度也逐渐降低,以至于雾滴速度从上到下不断减小,从外向里也逐渐减小,而且有一定的层次性。图 9a 显示雾滴的速度范围呈现出带状分布,雾滴运动速度方向沿原来的水平方向逐渐向轴向方向偏移,且内边缘比外边缘偏移的速

度快些。图 9b、9c 中可以看出，虽然雾滴速度也呈现带状分布，但是扰动明显增加，主要因为雾化盘转速增加，汽液相对运动也增加，速度从外向里有明显的变化。图 9d 可以看出，当雾化盘转速为 6 000 r/min 时，各个位置的雾滴速度比较均匀，没有明显的空气扰动，汽液相对运动达到平衡，喷雾效果比较好。当雾化盘的转速达到 7 000、8 000 r/min 时（图 9e、9f），速度变化很大，出现明显的分层现象，而且雾滴和空气掺杂、卷吸比较严重，尤其在雾化盘附近和雾型边缘处雾滴分布出现明显的旋涡。

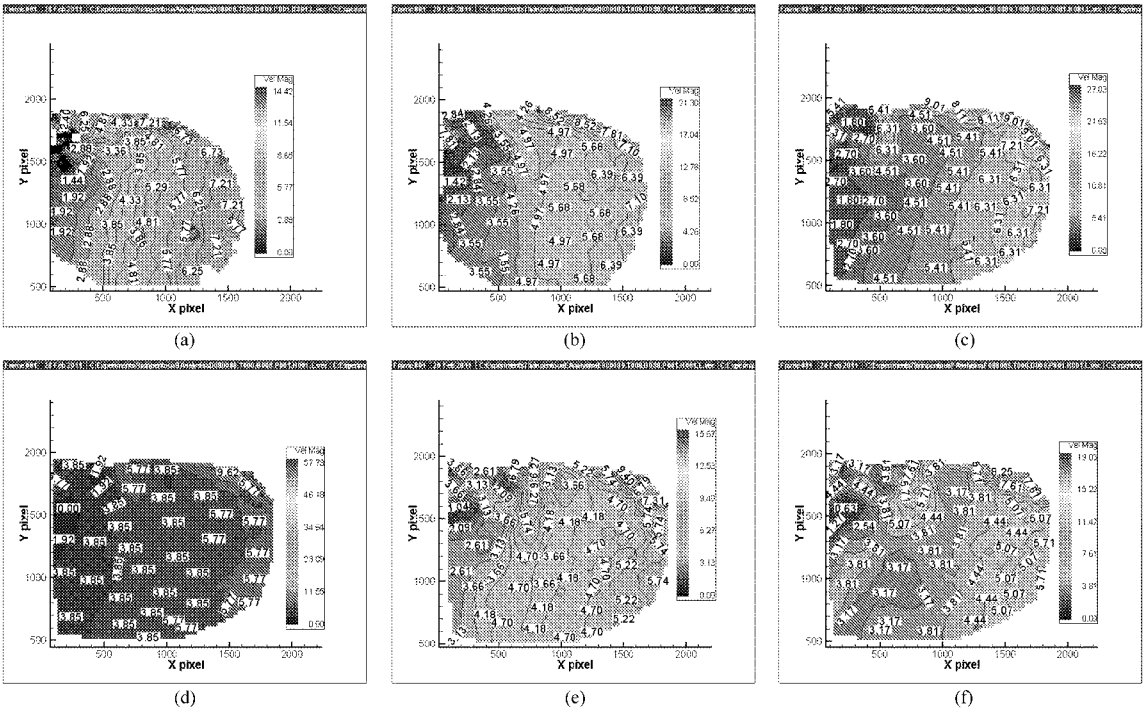

图 9　雾化盘不同转速时雾滴速度场测试结果

Fig. 9　Droplets velocity test result

（a）3 000 r/min　（b）4 000 r/min　（c）5 000 r/min　（d）6 000 r/min　（e）7 000 r/min　（f）8 000 r/min

通过上述试验可得雾化盘直径为 80 mm 的离心雾化喷头的最佳作业参数，即雾化盘转速为 6 000 r/min、流量为 48 L/h、雾滴的体积中径为 138.558 μm、喷幅为 3.42 m，这时雾化盘的电动机电压为 5.5 V，喷雾压力为 0.1 MPa。

3　结论

（1）采用德国 VARIO 公司多用途无人直升机设计的远程控制低量航空喷雾系统包括药箱、控制箱、液泵、管路系统、悬臂装置、雾化喷头和远程控制系统。

（2）用于无人机喷雾的 315 M 无线电发射模块和编码集成芯片 PT2262 配合使用，以及 315 M 超再生接收模块和解码集成芯片 PT2272 - LM4 配合使用的远程控制系统可以实现操作地面发射端来控制无人直升机中内置的无线接受模块内继电器的通、断，从而控制喷雾系统的施药工作。

（3）在雾化盘直径一定的情况下，影响离心雾化喷头喷雾效果的主要因素是雾化盘转速和流量，通过离心雾化喷头的喷幅、雾滴粒径、雾滴速度场等性能试验，获得适合小型无人机低空低量喷洒的雾化盘直径为 80 mm 的离心雾化喷头的最佳作业参数为：雾化盘转速 6 000 r/min、流量 48 L/h、雾滴的体积中径为 138.558 μm 和喷幅为 3.42 m。

参　考　文　献

1　张玲，戴奋奋. 我国植保机械及施药技术现状与发展趋势[J]. 中国农机化，2002(5)：34～35.
Zhang Ling, Dai Fenfen. Actuality and development trend about equipment for crop protection and the spray technique of agricultural chemicals in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2002(5): 34～35. (in Chinese)

2　龚艳，傅锡敏. 现代农业中的航空施药技术[J]. 农业装备技术，2008，34(6)：26～29.

3　薛新宇，梁建，傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化，2008(5)：72～74.
Xue Xinyu, Liang Jian, Fu Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(5): 72～74. (in Chinese)

4 Yanbo H, Wesley H, Bradley F, et al. Development of an unmanned aerial vehicle-based spray system for highly accurate site-specific application[C]// ASABE Annual International Meeting, June 30, 2008.
5 王立军,姜明海,孙文峰, 等. 飞机喷雾技术的探讨[J]. 农机化研究,2005(3):64~65.
6 张永格. 基于 AT89S51 单片机的无线遥控开关设计与实现[J]. 制造业自动化,2011,33(4):120~140.
Zhang Yongge. Design and implementation of the wireless remote control switch based on AT89S51 microcontroller[J]. Manufacturing Automation, 2011,33(4):120~140. (in Chinese)
7 李晓辉,任艳君. 四路无线遥控开关系统的设计与实现[J]. 现代电子技术,2007(12):66~68.
Li Xiaohui, Ren Yanjun. Design and realization of four-channel wireless remote control switch system[J]. Modern Electronics Technique, 2007(12):66~68. (in Chinese)
8 李建华. 实用遥控其制作[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.
9 Yanbo H, Wesley H, Lan Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6): 803~809.
10 Kirk I W. Measurement and prediction of helicopter spray nozzle atomization[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 27~37.
11 王荣. 植保机械学[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
12 宋吉林,祁力钧,孙小华, 等. 喷雾机雾滴大小和飞行时间的研究[J]. 农业机械学报,2007,38(4):54~57.
Song Jilin, Qi Lijun, Sun Xiaohua, et al. Study on flying time and distributing characteristic of droplet from sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4):54~57. (in Chinese)
13 周海燕,杨学军,严荷荣, 等. 风轮转盘式离心喷头试验[J]. 农业机械学报,2008,39(10):76~79.
Zhou Haiyan, Yang Xuejun, Yan Herong, et al. Experiment on rotary disc nozzle with impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):76~79. (in Chinese)
14 胡传胜,熊洪亮,虞先煌. 喷嘴液滴雾化细度和喷雾角测量装置的研究[J]. 能源研究与信息,2001,17(4):225~230.
Hu Chuansheng, Xiong Hongliang, Yu Xianhuang. An apparatus for determining simultaneously the atomized particle size and spray angle of the atomizing nozzle[J]. Energy Research and Information, 2001,17(4):225~230. (in Chinese)
15 杨小林,严敬. PIV 测速原理与应用[J]. 西华大学学报:自然科学版,2005, 24(1):19~21.
Yang Xiaolin, Yan Jing. Principles for the measurement and image processing using PIV[J]. Journal of Xihua University: Science and Technology, 2005,24(1):19~21. (in Chinese)
16 王贞涛,罗惕乾,岑旗钢. 荷电喷雾两相流场的试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):68~72.
Wang Zhentao, Luo Tiqian, Cen Qigang. Experiment on electrostatic spray two-phase flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(1):68~72. (in Chinese)
17 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)

(上接第 57 页)

8 吕晓兰,傅锡敏,吴萍, 等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):70~75.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on spray deposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):70~75. (in Chinese)
9 Kennedy I R, Solomon K R, Gee S J, et al. Achieving rational use of agrochemicals: environmental chemistry in action[M], Washington, DC: Rational Environmental Management of Agrochemicals, 2007.
10 毛益进,王秀,马伟. 农药喷洒雾滴粒径分布数值分析方法[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊 2):78~82.
Mao Yijin, Wang Xiu, Ma Wei. Numerical analysis method for predicting droplet size distribution of nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(Supp.2): 78~82. (in Chinese)
11 Miller P C H, Lane A G, O'Sullivan C M, et al. Factors influencing the risk of spray drift from nozzles operating on a boom sprayer [J], Aspects of Applied Biology, 2008,84(5):9~16.
12 Murphy S D, Miller P C H, Parkin C S. The effect of boom section and nozzle configuration on the risk of spray drift [J], Journal of Agricultural Engineering Research, 2000,75(2):127~137.
13 宋坚利,刘亚佳,张京, 等. 扇形雾喷头雾滴飘失机理[J]. 农业机械学报,2011,42(6):63~69.
Song Jianli, Liu Yajia, Zhang Jing, et al. Drift mechanism of flat fan nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):63~69. (in Chinese)