

扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验*

张慧春^{1,2} Dorr Gary² 郑加强¹ 周宏平¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 澳大利亚昆士兰大学理学院, 布里斯班 4343)

【摘要】 利用开路式风洞系统和 Sympatec 激光粒度仪测试了参考喷头的雾谱尺寸以此作为喷头雾谱等级的依据。对扇形雾喷头在不同压力、风速、喷头与激光粒度仪距离情况下的雾滴粒径、数量和范围进行了试验。试验结果表明,压力、风速、喷头与激光粒度仪之间距离的增大,都导致扇形雾喷头的雾滴体积中径变小,尺寸小于 150 μm 的雾滴占全部雾滴体积的百分比变大,增加了农药脱靶飘移的可能性,同时压力和风速的增大都导致部分喷头的雾谱等级降低。为了保证激光粒度仪对雾滴粒径测试结果的可靠性,可以使用风洞试验和调整喷头与激光粒度仪的距离,来减小因细小雾滴通过激光束过程中速度迅速衰减而对测量结果带来的影响。

关键词: 扇形喷头 参考喷头 风洞试验 雾滴粒径分布

中图分类号: S499; V211.74 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)06-0053-05

Wind Tunnel Experiment of Influence on Droplet Size Distribution of Flat Fan Nozzles

Zhang Huichun^{1,2} Dorr Gary² Zheng Jiaqiang¹ Zhou Hongping¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China

2. Faculty of Science, The University of Queensland, Brisbane 4343, Australia)

Abstract

To research the influence of spray operation parameters on droplet size distribution of flat fan nozzle, experiments were conducted by using an open circuit wind tunnel and a Sympatec laser diffraction analyzer. The droplet size of reference nozzle was tested to classify the nozzles' spray spectra. The droplet size distribution generated by different types of nozzles at different spraying pressure for different wind speed with various distances between the nozzle and the laser beam was analyzed. Experimental results showed that the VMD and percentage of the total volume contained in droplet sizes less than 150 μm increased with the increasing of the spray pressure, wind speed and distances between the nozzle and the laser beam. Moreover, the classifications of nozzle's spray spectrum became lower when the pressure and wind speed rose. The distance between the nozzle and the laser beam and wind tunnel experiment could be used to ensure the accuracy and reliability of measurement results when the laser diffraction analyzer was used to test the droplet size.

Key words Flat fan nozzle, Reference nozzle, Wind tunnel experiment, Droplet size distribution

引言

非目标的农药雾滴飘移现象,既影响杀虫效果,

还造成农药浪费、环境污染和害虫抗性增加等问题^[1-2]。完全避免雾滴飘移是不可能的,但采用科学的喷施技术可将飘移降低到最小^[3]。影响飘移

收稿日期: 2011-08-15 修回日期: 2011-10-10

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD19B08、2012BAD19B20)、国家林业公益性行业科研专项经费资助项目(201004052、200904051)、江苏省教育厅科研成果产业化资助项目(JHB2011-12)、江苏高校优势学科建设工程资助项目和江苏省有害生物入侵预防与控制重点实验室开放课题资助项目(PMIS200904)

作者简介: 张慧春,副教授,澳大利亚昆士兰大学博士后,主要从事智能植保机械和3S集成技术研究,E-mail: njzhanghc@hotmail.com

的因素有雾滴粒径、喷雾高度和气象条件等,但雾滴粒径是最主要的因素^[4]。目前,研究农药飘移的方法主要有田间试验、风洞试验和仿真模拟,由于田间试验条件限制多、耗费大,仿真模拟很难完全进行湍流等空气流动对于喷施的影响,因此风洞试验以数据可靠性高、可重复性强等优点而在农药飘移与雾滴粒径的基础理论研究中备受青睐^[5]。大多先进的雾滴粒径测量装置为自动装置,使用计算机和高速照明源如激光在几秒内对上万雾滴进行分析,但是喷头到激光光束的不同测试距离对雾滴粒径测量结果的影响未进行分析^[6]。而且我国判断喷头雾谱范围是依据经验或厂家推荐,没有量化的参照标准^[7]。

本文拟利用开路式风洞和激光粒度仪对参考喷头的雾谱尺寸和扇形雾喷头在不同压力、风速、喷雾距离等情况下的雾滴粒径、数量、范围进行试验,以提供判断喷头雾谱等级的量化标准,分析施药技术参数和测试环境因素对扇形雾喷头喷雾粒径分布的影响,为减少雾滴飘移的施药技术研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 雾滴粒径分布与喷雾飘移的关系

雾滴粒径是决定农药飘移和沉降的关键因素。雾滴越小、雾滴数目就越多,覆盖面积大且比较均匀,并能渗入空隙粘附在植株上。但小雾滴由于质量小,在空气阻力作用下下降速度不断降低,时常没有足够的向下动量到达靶标。小雾滴也更易受温度和湿度的影响,蒸发后更小顺风飘移也更远,造成环境污染的危险性越大。雾滴越大,覆盖性能越差,但飘失越少^[8-9]。

分析评价喷头雾化性能参数为:雾滴累计分布为 10% 的雾滴直径 D_{10} ,即小于此雾滴直径的雾粒体积占全部雾粒体积的 10%;雾滴累计分布为 50% 的雾滴直径 D_{50} ,即小于此雾滴直径的雾粒体积占全部雾粒体积的 50%,也称为体积中径 (volume median diameter, 简称 VMD)。雾滴累计分布为 90% 的雾滴直径 D_{90} ^[10];分布跨度 S 是雾滴粒径分布宽度的一种度量, $S = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$ 。对于对称分布, $S = 1$ 。一致性是另一个描述粒径分布对称性的参数, S 越小,雾滴粒径分布越窄,其一致性越小,反则越大;尺寸小于 $150 \mu\text{m}$ 的雾滴占全部雾粒体积的百分比 $\Phi_{Vol < 150 \mu\text{m}}$ ^[11]。小于 $150 \mu\text{m}$ 的雾滴相对表面积较小,易挥发,抗飘移性差^[12]。

1.2 试验装置

试验在澳大利亚昆士兰大学理学院农药应用与安全研究中心 (The Center for Pesticide Application

and Safety, 简称 CPAS) 进行。试验装置由开路式风洞、透明工作区、激光粒度仪和排气滤净系统组成。开路式风洞用来产生和控制气流,以模拟气体的流动并量度气流对施药过程的作用,其温度、湿度、风速和喷雾压力准确稳定、精确可调。工作区为 $10 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.75 \text{ m}$,风速最高可调节至 300 km/h (83 m/s),覆盖从地面喷施的低速到航空喷施的高速以研究真实施药条件下风速对雾滴粒径和农药飘移的影响。风洞试验装置还包括 75 kW 变速电动机驱动的离心风扇、流量校正部分、工作区和排气滤净器引出系统,其中排气滤净器引出系统用于向空气排气前从气体中滤除农药雾滴。激光粒度仪安装在风洞透明工作区以方便监督观察喷雾情况。喷头雾化产生的喷雾扇面空间中各点的雾滴粒径分布由安装 R7 镜头 ($0.5 \sim 3\,500 \mu\text{m}$ 的动态尺寸范围) 的 Sympatec HELOS VARIO Helios 激光粒度仪 (德国 Sympatec GmbH) 测试。两个起重机架安置激光粒度仪和喷头系统。在测试过程中,喷头安装在一个能进行三维空间移动的坐标架上,通过计算机输入指令实现三维坐标架运动并控制激光粒度仪,从而使激光粒度仪能测量喷头喷施雾滴的一个动态雾化过程。射出的喷雾能够被激光光波穿过,确保完整地测量整个喷雾羽流 (图 1)。喷雾过程中,HELOS 软件记录并显示雾滴测试数据及分布曲线。

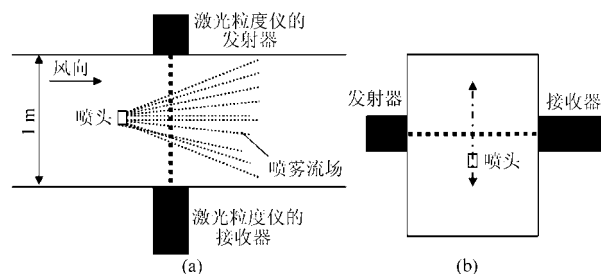


图 1 风洞中雾滴粒径测量的试验布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental layout for measurement of droplet size in wind tunnel
(a) 俯视图 (b) 左视图

1.3 试验设计

农林生产中经常使用扇形雾喷头,其特点是能产生高冲击力的液柱流或扇形喷雾,这种喷头产生的喷雾分布均匀,雾滴粒径为小到中等,防飘移性较好,当需要若干个喷头同时工作产生重叠喷雾时,逐渐变细的喷雾边缘使得喷射区域分布均匀。因此,本文选用 TeeJet 公司的 AIXR11002 型气吸扇形喷头,TT11002 型广角扇形喷头,XR11002 型延长范围扇形喷头,11001 型扇形喷头,TP6501 型、TP6502 型、TP6503 型、TP6504 型均匀航空用扇形喷头,以及美国 HYPRO 公司的 HYPRO 扇形喷头等。测试过程

中室温恒定,试验介质为清水。每组试验重复 3 次,取其平均值作为最终数据。

(1)参考喷头的雾滴粒径分布试验

根据喷头的雾谱分类,把喷头分为非常细、细、中等、粗、非常粗和极粗 6 个喷雾等级,一个喷头可以根据流量、工作压力和其他操作条件不同而界定为一个或多个雾滴粒径等级,通常喷头的喷雾等级是在标准喷头通过水介质时雾滴粒径的基础上进行判断的。本文对 11001 型、11003 型、12006 型、8008 型和 6510 型等 5 种参考喷头在规定的标准喷施压力、风速等条件下对雾滴粒径进行测量,以此结果作为其他喷头雾谱等级判断依据。

(2)喷施压力

对 AIXR11002 型、TT11002 型和 XR11002 型喷头在风速 6.71 m/s、喷头与激光粒度仪距离 15 cm 时,压力为 276、300、450 kPa 情况下雾滴粒径、数量、范围进行试验;对 11001 型喷头在风速 2.57 m/s、喷头与激光粒度仪的距离 15 cm 时,压力为 150、300、450 kPa 情况下进行试验,分析施药压力对喷雾雾滴粒径分布的影响。

(3)风速

对 TP6501 型、TP6502 型、TP6503 型和 TP6504 型喷头在风速为 50 m/s 和 73 m/s 时喷头与激光粒度仪的距离 15 cm、压力 350 kPa 情况下的雾滴粒径、数量、范围进行试验,分析航空喷雾时风速对喷雾雾滴粒径分布的影响。对 11001 型喷头在风速为 2.57 m/s 和 6.71 m/s 时喷头与激光粒度仪的距离 15 cm、压力 450 kPa 情况下的雾滴粒径、数量、范围进行试验,分析地面喷雾时风速对喷雾雾滴粒径分布的影响。

(4)喷头与激光粒度仪距离

对 AIXR11002 型、TT11002 型、XR11002 型和

HYPRO 型喷头在风速 6.71 m/s 时喷头与激光粒度仪距离为 15 cm 和 50 cm,压力 276 kPa 情况下的雾滴粒径、数量、范围进行试验;对 11001 型喷头在风速 6.71 m/s 时喷头与激光粒度仪距离为 15 cm 和 50 cm,压力 450 kPa 情况下进行试验,分析喷头与激光粒度仪距离对喷雾雾滴粒径分布的影响。

2 结果与分析

2.1 参考喷头雾滴粒径分布

11001 型、11003 型、12006 型、8008 型和 6510 型 5 种参考喷头在规定的标准喷施压力下的雾滴粒径分布参数如表 1 所示。在界定其他喷头雾谱等级时,对比 D_{v10} 、 D_{v50} 和 D_{v90} 等参数,数值低于 11001 型喷头的为非常细,介于 11001 型喷头与 11003 型喷头的为细,以此类推,大于 6510 型喷头的为极粗。

表 1 标准喷施压力下 5 种参考喷头的雾滴粒径分布参数

Tab.1 Droplet size distributions of five reference nozzles under standard operating pressures						
喷头 型号	压力 /kPa	风速 /m·s ⁻¹	D_{v10} /μm	D_{v50} /μm	D_{v90} /μm	$\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ /%
11001	450	5.4	61	130	216	62.61
11003	300	5.4	117	259	453	17.41
12006	200	5.4	169	361	596	7.41
8008	250	5.4	239	508	844	3.06
6510	200	5.4	301	600	935	2.42

2.2 喷施压力

AIXR11002 型、TT11002 型、XR11002 型和 11001 型 4 种扇形喷头在不同喷施压力下的雾滴粒径分布参数如表 2 所示。由表 2 可知,针对每种测试喷头,AIXR11002 型、TT11002 型、XR11002 型喷

表 2 不同喷施压力下 4 种喷头的雾滴粒径分布参数

Tab.2 Droplet size distributions of four nozzles under different operating pressures									
喷头型号	压力/kPa	喷头到激光粒度 仪的距离/cm	风速 /m·s ⁻¹	D_{v10} /μm	D_{v50} /μm	D_{v90} /μm	S	$\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ /%	等级
AIXR11002	276	15	6.71	240	461	706	1.01	2.53	粗
	300	15	6.71	196	404	701	1.25	4.84	粗
	450	15	6.71	159	354	582	1.19	8.79	中
TT11002	276	15	6.71	143	329	559	1.26	8.62	中
	300	15	6.71	158	316	517	1.14	11.07	中
	450	15	6.71	108	250	474	1.46	20.83	细
XR11002	276	15	6.71	100	217	363	1.21	25.14	细
	300	15	6.71	80	186	328	1.33	35.81	细
	450	15	6.71	72	179	325	1.41	38.29	细
11001	150	15	2.57	86	204	405	1.56	30.45	细
	300	15	2.57	62	155	300	1.54	47.94	细
	450	15	2.57	54	139	255	1.45	55.29	非常细

头的 S 随压力增大而增大,而 11001 型喷头的 S 随压力增大而减小,4 种喷头的 $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 随着压力增大都呈现显著增大趋势。当压力达 450 kPa 时,除 XR11002 型喷头雾谱等级保持不变外,其他型号喷头均降低。经计算,压力平均增大 60% 时, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大 78%, D_{V50} 平均减小 22%。

相同压力下, AIXR11002 型喷头产生的雾滴粒径最大, AIXR11002 型气吸型扇形喷头由于文丘里作用,在前置喷孔产生高速液流,通过边孔吸气,所以空气、液体混合产生的雾滴粒径更大。不同类型喷头的雾滴体积中径、 S 和 $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 不同,这表明通过使用不同类型喷嘴可覆盖很大的雾滴粒径图谱。

表 3 不同风速下 5 种喷头雾滴粒径分布参数
Tab.3 Droplet size distributions of five aerial application nozzles at different wind speeds

喷头型号	压力/kPa	喷头到激光粒度仪的距离/cm	风速 / $m \cdot s^{-1}$	D_{V10} / μm	D_{V50} / μm	D_{V90} / μm	S	$\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ /%	等级
TP6501	350	15	50	50	135	221	1.27	58.48	非常细
	350	15	73	23	92	157	1.46	87.97	非常细
TP6502	350	15	50	79	190	298	1.15	32.35	细
	350	15	73	20	95	169	1.57	83.83	非常细
TP6503	350	15	50	68	173	281	1.23	39.17	细
	350	15	73	25	104	178	1.47	78.97	非常细
TP6504	350	15	50	68	176	284	1.23	37.97	细
	350	15	73	23	104	178	1.49	78.80	非常细
11001	450	15	2.57	54	139	255	1.45	55.29	非常细
	450	15	6.71	60	132	248	1.42	60.04	非常细

航空喷雾条件下,风速较大,雾滴主要是由风力作用形成雾化,而不是喷雾压力的影响,因此当风速从 50 m/s 增加至 73 m/s 时,雾滴 D_{V10} 、 D_{V50} 和 D_{V90} 变化很大;地面喷雾条件下,风速较小,压力是雾滴雾化的主要影响因素,风速对于雾滴的粒径影响较小,因此当风速由 2.57 m/s 变化至 6.71 m/s 时,雾滴的 D_{V10} 、 D_{V50} 和 D_{V90} 变化不明显。

2.4 喷头与激光粒度仪距离

AIXR11002 型、TT11002 型、XR11002 型、HYPRO 型和 11001 型喷头与激光粒度仪的距离不同时雾滴粒径分布参数如表 4 所示。由表 4 可知,随着喷头与激光粒度仪的距离增大, AIXR11002 型、TT11002 型、XR11002 型、HYPRO 型喷头的 S 增大,而 11001 型喷头的 S 减小,5 种喷头的 $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 都随之增大。经计算,喷头与激光粒度仪的距离增大 233% 时, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大 75%, D_{V50} 平均减小 15%。但距离的改变并不影响喷头的雾谱等级。

喷头与激光粒度仪的距离对于雾滴粒径分布的影响主要是由于雾滴粒径测量仪器的时空采样性。

2.3 风速

TP6501 型、TP6502 型、TP6503 型、TP6504 型和 11001 型喷头在不同风速下雾滴粒径分布参数如表 3 所示。在影响飘移的气候条件中风速是主要因素,风速越大,小雾滴极易悬浮在大气层中,脱靶飘移就越远,而且风速在一天中是经常变化的。由表 3 可知,针对 4 种航空用喷头,风速增大, S 增大, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 也随之增大。经计算,风速平均增大 46% 时, S 平均增大 23%, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大 74%。针对 11001 型喷头,风速增大, S 略微降低,而 $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 随之增大。对于 TP6502 型、TP6503 型和 TP6504 型喷头,风速增大时,雾谱等级降低。风速平均增大 69% 时, D_{V50} 平均减小 58%。

对于激光粒度仪的空间系统而言,雾滴通过激光束的速度会影响测量结果。当所有液滴离开喷嘴、雾滴雾化刚完时,雾滴运动初始阶段的速度几乎相同,不同粒径的雾滴都具有较大的动能。然而在继续运动过程中,不断卷吸并混合外界气流,使得射流断面不断扩大,雾滴的运动速度不断降低^[13]。小液滴的动能由于空气阻力作用迅速衰减,它运动速度的衰减率比大液滴快,大液滴迅速穿过用于测量的激光束,但小液滴要花费更长的时间来穿过激光束。而激光粒度仪测试的是一段时间内雾谱范围的平均值,从而使系统测量出的雾滴粒径变小,降低了结果的准确性。因此,当喷头与激光粒度仪的距离较大时,激光粒度仪测试小液滴的时间更长,这样激光粒度仪提供的雾滴粒径测量结果就更小。同时,这也是风洞试验可以有效保证雾滴粒径分布结果可靠性的原因,因为风速可以减缓小液滴速度迅速减小的趋势,来自于风洞的风速能使风速的差别最小化,来提高激光粒度仪测量结果的准确性。

表 4 喷头与激光粒度仪的距离不同时 5 种喷头雾滴粒径分布参数

Tab.4 Droplet size distributions of five nozzle types at different distances between nozzle to laser beam									
喷头型号	压力/kPa	喷头到激光粒度 仪的距离/cm	风速 /m·s ⁻¹	D_{V10} /μm	D_{V50} /μm	D_{V90} /μm	S	$\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ /%	等级
AIXR11002	276	15	6.71	240	461	706	1.01	2.53	粗
	276	50	6.71	173	397	669	1.25	7.02	粗
TT11002	276	15	6.71	143	329	559	1.26	11.07	中
	276	50	6.71	122	262	542	1.60	16.72	中
XR11002	276	15	6.71	100	217	363	1.21	25.14	细
	276	50	6.71	82	173	308	1.31	39.52	细
HYPRO	276	15	6.71	215	444	704	1.10	3.84	粗
	276	50	6.71	187	420	699	1.22	5.36	粗
11001	450	15	6.71	60	132	248	1.42	60.04	非常细
	450	50	6.71	69	130	211	1.09	63.55	非常细

3 结论

(1)判断喷头的雾谱等级时,可运用参考喷头的 D_{V10} 、 D_{V50} 和 D_{V90} 等参数与其进行对比,由量化结果判断喷头的性能。

(2)增大压力导致雾滴体积中径变小,尺寸小于150 μm 的雾滴占全部雾滴体积的百分比变大,部分喷头的雾谱等级降低。压力平均增大60%时,扇形喷头的雾滴体积中径平均减小22%, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大78%。相同压力下,AIXR11002型气吸型扇形喷头产生的雾滴粒径最大,喷雾压力的改变对于XR11002型扇形喷头延长范围的影响最小。

(3)增大风速导致雾滴体积中径变小,尺寸小

于150 μm 的雾滴占全部雾滴体积的百分比变大。航空用喷头,雾滴雾化的主要原因是风力的雾化作用,风速平均增大46%时雾滴体积中径平均减小71%, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大74%。地面用喷头,压力是雾滴雾化的主要影响因素,风速对于雾滴的粒径影响较小,风速增大161%时雾滴体积中径减小5%, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 增大9%。

(4)增大喷头与激光粒度仪之间的距离导致雾滴体积中径变小,但不影响喷头的雾谱等级。距离增大233%时,雾滴体积中径平均减小15%, $\Phi_{Vol < 150 \mu m}$ 平均增大75%。为了提高激光粒度仪的雾滴粒径测试结果的准确性,可以使用风洞试验和调整喷头与激光粒度仪的距离,来减小因细小雾滴迅速衰减而对测量结果带来的影响。

参 考 文 献

1 郑加强,周宏平,徐幼林. 农药精确使用技术[M]. 北京:科学出版社,2006

2 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(1):59~63.
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Song Jianli, et al. Influence of spray operating parameters on spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):59~63. (in Chinese)

3 刘秀娟,周宏平,郑加强. 农药雾滴飘移控制技术研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(1):186~190.
Liu Xiujuan, Zhou Hongping, Zheng Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(1): 186~190. (in Chinese)

4 Dorr G, Hanan J, Adkins S, et al. Spray deposition on plant surfaces: a modelling approach[J], Functional Plant Biology, 2008, 35(2):988~996.

5 张京,宋坚利,何雄奎,等. 扇形雾喷头雾化过程中雾滴运动特性[J]. 农业机械学报,2011,42(4):66~69,75.
Zhang Jing, Song Jianli, He Xiongkui, et al. Droplets movement characteristics in atomization process of flat nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):66~69,75. (in Chinese)

6 祁力钧,胡开群,莽璐,等. 基于图像处理的雾滴检测技术[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):48~51.
Qi Lijun, Hu Kaiqun, Mang Lu, et al. Droplet detection based on image processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):48~51. (in Chinese)

7 ANSI/ASABE S572.1—2009 Spray nozzle classification by droplet spectra[S]. 2009.

- 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)