

## 气助式静电喷头雾化性能和荷电效果试验

刘春景<sup>1,2</sup>, 王科元<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 机电学院, 江苏 南京 210037 2. 蚌埠学院 机电系, 安徽 蚌埠 233030 3. 石河子大学 机电学院, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 设计一种气助式静电感应喷头, 对其工作原理和关键结构进行了研究。在室内对它进行了雾化性能试验和荷电效果试验。由试验结果分析了充电电压、气体压力与流量、液体压力与流量、喷孔直径等参数对雾化质量和荷电效果的影响, 综合分析气体压力为 0.4 MPa, 液体压力为 0.25 MPa, 喷孔直径为 2.0 mm 时气助式静电感应喷头具有最优化性能。图 3 表 6 参 15

**关键词:** 静电喷头; 试验分析; 雾化性能; 荷电效果

**中图分类号:** S491; TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5692(2009)01-0116-06

## Atomization quality and charge performance experimentation research on air-assisted electrostatic spraying nozzle

LIU Chun-jing<sup>1,2</sup>, WANG Ke-yuan<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, College of Bengbu, Bengbu 233030, Anhui, China; 3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

**Abstract:** An air-assisted electrostatic-induction nozzle was designed. The basic designing theories, structure and working process of this nozzle were specified in the paper. And then the atomization quality and charge performances of this nozzle and its affecting factors were studied by carrying out performance experiment and statistic analysis. Within the experiment, air pressure at 0.4 MPa, liquid pressure at 0.25 MPa, jet orifice diameter at 2.0 mm were the most suitable parameters for the nozzle. [Ch, 3 fig. 6 tab. 15 ref.]

**Key words:** electrostatic nozzle; test analysis; atomization quality; charge performance

静电喷雾技术是跟随超低量喷雾技术发展起来的一项新技术, 是指将液滴引入高压电场从而使得它们分散形成粒径在微米级别微小雾滴的一种技术。药液雾滴带电后, 在电场力的作用下, 命中率显著提高, 覆盖均匀, 沉降速度快, 在作物上的附着量增大, 尤其是增强了作物下部和叶背的附着能力, 减少了飘移损失和农药对环境造成的污染。国外很早就已开始了静电喷雾的研究, 已出现了一些农用静电喷雾器的专利和商业化生产的静电喷雾机。美国乔治亚大学的专家们研制成功了静电喷雾系统<sup>[1]</sup>, 经过多年的研究改进, 已经由美国 ESS(Electrostatic Spraying System Inc.)公司投入商品化生产。英国农业工程学院研制了转盘式静电喷头<sup>[2]</sup>。该喷头的主要特色在于感应电极与转盘同轴旋转, 高压电路用轴承接通, 使高压输入到旋转的电极上。德国霍恩海姆大学研制了气流剪切式静电喷头, 用于背负式喷雾机上。日本千叶大学试制了双流体静电喷头。国内仅江苏大学、山西农业大学在从事静电

收稿日期: 2008-03-17; 修回日期: 2008-06-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD08A1203)

作者简介: 刘春景, 博士研究生, 从事现代机械设计理论与方法研究。E-mail: liusun7575@163.com

喷雾技术研究<sup>[3-15]</sup>。静电喷头是静电喷雾机的核心部件之一，主要作用是实现药液雾化和雾滴荷电，因此，静电喷头是静电喷雾得以实现的关键。静电喷头的结构对雾化性能和荷电性能有决定性影响。静电喷头设计主要包括雾化性能和荷电性能，既要求能产生较小且均匀的雾滴，又要求具有尽可能大的雾滴荷质比。传统静电喷头由于射程短、漏电和反向电离严重等问题，在实用化过程中遇到了难题。研制一种气助式静电感应喷头(液流在喷头内破碎分裂的喷头)，这种喷头可以将感应电极放在紧挨着雾滴形成区的地方，感应电极完全嵌入喷头体内，可以利用喷头内高速的气流来保持感应电极完全干燥，这样可阻止雾滴沉积到电极表面，因而能防止电极反向电离，而且该喷头采用感应方式充电，所需充电电压低。

### 1 结构设计

设计的气助式静电感应喷头的结构如图 1a 所示，主要由喷嘴体、喷孔片、环形电极、进气管和喷嘴帽等组成。喷嘴体由金属材料制成，有一个液流导管和一个气流导管。工作时，喷嘴体的电位为 0 或接近于 0，同时使液流保持这个电位。喷嘴帽用绝缘材料制成，直接组装到金属材料喷嘴体上，在喷嘴帽内嵌入环形电极，环形电极由黄铜制成，埋在通道和成雾区附近，用一个微型插头与外部高压静电发生器连接。为使喷头的结构更加直观，使用 Pro/E 创建了喷头的三维结构图如图 1b 所示。变动结构参数加工出几个喷头样品进行试验，测试所设计喷头的工作性能。

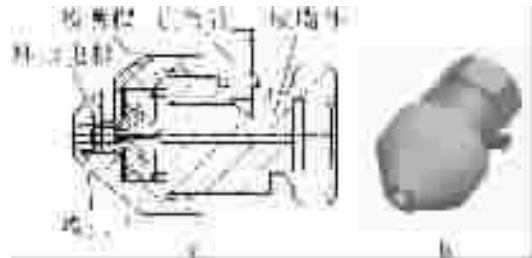


图 1 气助式静电喷头结构图和三维结构图  
Figure 1 Structure(a) and 3D-structure(b) of electrostatic nozzle

### 2 雾化性能试验

#### 2.1 试验装置与流程

所用试验装置示意图如图 2 所示，流程图如图 3 所示。

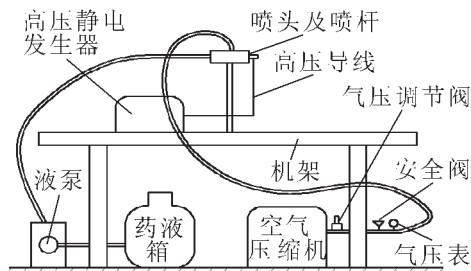


图 2 静电喷头试验装置示意图  
Figure 2 Schematic diagram of electrostatic nozzle experiment

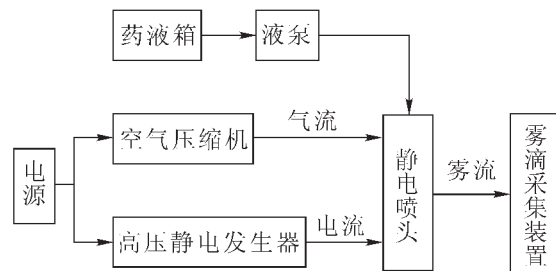


图 3 试验流程图  
Figure 3 Experiment flowchart

#### 2.2 试验设计

试验的主要目的是：①获得静电喷头的雾化特性；②考察所筛选因素对雾化质量的影响。选定气体压力、液体压力、喷孔直径和充电电压等为试验因素，每个因素 3 个水平，在距喷头一定距离处采样，于激光粒度仪下测定雾滴直径。因素及所取水平见表 1。

#### 2.3 试验结果

由雾滴直径样本计算出表征雾化质量的雾滴体积

表 1 试验因素与水平列表

Table 1 Experiment factors and levels

水平	试验因素			
	$p_s$ /MPa	$p_l$ /MPa	$D$ /mm	$U$ /kV
1	0.2	0.20	1.5	1
2	0.4	0.25	2.0	3
3	0.6	0.30	2.5	6

中径(VMD), 雾滴数量中径(NMD), 雾滴均匀度(DR)和雾滴直径标准差(std), 与相应的因素水平汇总于表2。采用统计学的回归分析方法, 利用SPSS软件对表2中所述的雾化性能试验数据进行处理, 并由分析结果讨论喷头雾化质量最佳时静电喷头的各项参数。

表2中的数据表明, 所测得雾滴体积中径(VMD)均为30~60  $\mu\text{m}$ , 雾滴均匀度(DR)均大于0.67, 说明该喷头的雾流具有较小的雾滴尺寸和理想的均匀度, 雾化性能较好。

表2 试验结果

Table 2 Experiment results

试验号	试验因素						试验结果			
	$p_a$	$p_l$	$D$	$U$	$Q_a$	$Q_l$	VMD	NMD	DR	std
1	0.2	0.20	1.5	1	17.5	100	46.44	38.99	0.84	12.62
2	0.2	0.20	2.0	3	20.7	120	43.00	34.40	0.80	11.72
3	0.2	0.20	2.5	6	13.6	70	41.28	36.12	0.87	8.56
4	0.2	0.25	1.5	3	13.6	85	43.57	34.97	0.80	11.84
5	0.2	0.25	2.0	6	17.5	100	49.45	43.00	0.87	11.15
6	0.2	0.25	2.5	1	20.7	70	45.15	40.42	0.89	10.76
7	0.2	0.30	1.5	6	20.7	100	48.73	42.14	0.86	12.35
8	0.2	0.30	2.0	1	13.6	100	57.66	49.45	0.85	11.27
9	0.2	0.30	2.5	3	17.5	85	46.87	42.14	0.90	9.54
10	0.4	0.20	1.5	3	21.8	100	43.00	40.13	0.77	13.33
11	0.4	0.20	2.0	6	25.1	120	38.70	32.68	0.84	10.76
12	0.4	0.20	2.5	1	28.2	70	39.99	33.54	0.92	8.25
13	0.4	0.25	1.5	6	28.2	120	40.13	43.00	0.86	11.43
14	0.4	0.25	2.0	1	25.1	130	40.85	30.10	0.85	8.86
15	0.4	0.25	2.5	3	21.8	85	42.14	30.10	0.78	9.46
16	0.4	0.30	1.5	1	25.1	120	43.00	36.98	0.86	11.55
17	0.4	0.30	2.0	3	28.2	130	43.00	35.26	0.89	8.98
18	0.4	0.30	2.5	6	21.8	120	38.70	34.40	0.89	8.11
19	0.6	0.20	1.5	6	36.8	170	52.17	40.10	0.72	13.58
20	0.6	0.20	2.0	1	23.7	130	38.70	31.55	0.81	11.74
21	0.6	0.20	2.5	3	30.3	120	36.55	32.24	0.90	8.56
22	0.6	0.25	1.5	1	30.3	170	50.17	42.66	0.79	10.98
23	0.6	0.25	2.0	3	36.8	150	35.26	30.25	0.82	8.54
24	0.6	0.25	2.5	6	23.7	120	38.70	30.45	0.77	9.66
25	0.6	0.30	1.5	3	23.7	150	43.00	40.98	0.86	12.12
26	0.6	0.30	2.0	6	30.3	200	39.56	37.26	0.88	8.78
27	0.6	0.30	2.5	1	36.8	150	38.70	35.20	0.89	8.09

说明:  $p_a$  为气体压力;  $p_l$  为液体压力;  $D$  为喷孔直径;  $U$  为充电电压;  $Q_a$  为气体流量;  $Q_l$  为液体流量。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 各因素对雾滴体积中径(VMD)效应的方差分析

利用表2中的数据, 对各试验因素对雾滴体积中径(VMD)的主效应及交互作用效应进行方差分

析，其中因素 E 和 F 的离差平方和较小，可作为误差项来考查。分析结果见表 3。

### 3.2 雾滴体积中径回归方程及显著性检验

由参考文献[8]可知，雾滴体积中径回归模型为：

$$d_{VMD} = e^{\beta_0} \cdot e^{\beta_1 U} \cdot p_a^{\beta_2} \cdot D^{\beta_3} \cdot e^{\beta_4 p_1} \cdot Q_a^{\beta_5} \cdot Q_1^{\beta_6}$$

其中： $d_{VMD}$  为雾滴体积中径； $U$  为充电电压； $p_a$  为气体压力； $p_1$  为液体压力； $D$  为喷孔直径； $Q_a$  为气体流量； $Q_1$  为液体流量。

雾滴体积中径回归方程为<sup>[5,8]</sup>：

$$d_{VMD} = 25.661\ 71 \cdot e^{-0.007U} \cdot p_a^{-0.218} \cdot D^{-0.171} \cdot e^{-0.326p_1} \cdot Q_a^{-0.055} \cdot Q_1^{-0.100}$$

回归方程的显著性检验结果见表 4。由表 4 结果可知，雾滴体积中径回归方程的显著性检验结果为极显著，说明可以用雾滴体积中径回归模型来描述气助式静电喷头雾滴体积中径与各试验因素的关系，且具有较高的精度。试验因素对应回归参数的显著性检验结果表明，气体压力和喷孔直径显著性为极显著(尾概率为 0.005 和 0.020)，与方差分析结果一致，说明这 2 个因素是影响雾滴体积中径大小的主导因素。

表 3 各因素对雾滴体积中径 VMD 效应的方差分析表

Table 3 Variance analysis of factor's effects on droplet volume medium diameter

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	显著性
因素 A( $p_a$ )	96.598 0	2	48.299 0	22.8	极显著
因素 B( $p_1$ )	11.067 8	2	5.533 9	2.6	
因素 C( $D$ )	49.629 4	2	24.814 7	11.7	极显著
因素 D( $U$ )	16.407 2	2	8.203 6	3.9	
A × B( $p_a \times p_1$ )	48.406 9	4	12.101 7	2.2	
A × C( $p_a \times D$ )	44.166 9	4	11.041 7	5.2	显著
B × C( $p_1 \times D$ )	16.112 8	4	4.028 2	1.9	
误差	12.710 1	6	2.118 3		
总和	309.120 9	26			

说明： $p_a$  为气体压力； $p_1$  为液体压力； $D$  为喷孔直径； $U$  为充电电压。 $F_{0.01}(2,6) = 10.92, F_{0.05}(2,6) = 5.14, F_{0.01}(4,6) = 9.15, F_{0.05}(4,6) = 4.53$ 。

表 4 雾滴体积中径回归方程的显著性检验

Table 4 Significance test of droplet VMD regression equation

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	尾概率 $P_t > F$
模型	6	0.155	0.026	2.771	0.040
误差	20	0.186	0.009		
总和	26	0.341			
方差来源	自由度	参数估计值	标准差	t 值	尾概率 $P_t > F$
$\beta_0$		3.240	0.098	37.234	<0.000 1
$\beta_1$	1	- 0.014	0.009	- 0.599	0.555
$\beta_2$	1	- 0.437	0.063	- 3.097	0.005
$\beta_3$	1	- 0.343	0.085	- 2.491	0.020
$\beta_4$	1	0.652	0.494	1.091	0.286
$\beta_5$	1	- 0.110	0.121	0.800	- 0.053
$\beta_6$	1	0.200	0.130	0.366	0.189

### 3.3 各因素对雾滴直径均匀度(DR)的影响

利用表 2 中的数据，建立考察各试验因素对雾滴直径均匀度(DR)的主效应及交互作用效应的方差分析模型。由表 5 可知，方差分析模型高度显著，表明雾滴直径均匀度可以由表 5 所列各变量的线性组合来表示雾滴直径均匀度随各因素线性变化。

在各影响因素中，液体压力、喷孔直径和液体流量对雾滴直径均匀度的影响显著(显著性水平为 0.05)，大气压力和喷孔直径的交互作用影响显著，其他因素及交互作用影响不显著。这表明，只要控制好这几个影响因素就可使雾化均匀性达到稳定状态，且具有理想的均匀度。

### 3.4 各因素对雾滴直径标准差(std)的影响

样本数据的标准差,是表征样本数据离散程度大小的统计量,所以,雾滴直径分布的标准差同样可以反映雾滴直径的离散程度,可以用来衡量雾滴直径分布的均匀性,即用来表征静电喷头的雾化均匀性。

由表3中的数据完成对雾滴直径标准差的方差分析,结果汇于表6。分析结果表明,方差分析模型高度显著,试验因素气体压力与喷孔直径对雾滴直径标准差的影响高度显著,充电电压对雾滴直径标准差的影响显著;气体压力与液体压力、气体压力与喷孔直径的交互作用对雾滴直径标准差的影响极显著。

## 4 结论

研究表明:①试验所测得的雾滴体积中径(VMD)均为30~60 μm,雾滴均匀度(DR)均大于0.67,说明该喷头具有较小的雾滴尺寸和较理想的均匀度。②雾滴体积中径回归模型极显著,说明可以用雾滴体积中径回归模型来描述气助式静电喷头雾滴体积中径与各试验因素的关系,且具有较高的精度。③按影响雾滴体积中径的重要性程度,因素排序依次为气体压力、喷孔直径、充电电压、液体压力、气体流量和液体流量。④液体压力、喷孔直径和液体流量对雾滴直径均匀度的影响显著,其他因素及交互作用影响不显著。⑤气体压力、喷孔直径和充电电压对雾滴直径标准差的影响显著,气体压力与液体压力、气体压力与喷孔直径的交互作用对雾滴直径标准差的影响极显著,其他因素以及交互作用影响均不显著。⑥雾滴荷电后可以显著提高均匀性,减少小雾滴的飘移。⑦综合分析认为,气体压力以0.4 MPa为宜,液体压力以0.25 MPa为宜,喷孔直径以2.0 mm为宜。

### 参考文献:

- [1] LAW S E, COOPER S C. Depositional characteristics of charged and uncharged droplets applied by an orchard air carrier sprayer[J]. *Trans ASAE*, 1998, 31 (4): 984 - 989.

表5 各因素对雾滴直径均匀度效应的方差分析表

Table 5 Variance analysis of factor's effects on droplet uniformity

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	显著性
因素 A( $p_a$ )	0.000 220	1	0.000 220	0.30	
因素 B( $p_l$ )	0.004 345	1	0.004 345	5.96	显著
因素 C( $D$ )	0.003 981	1	0.003 810	5.46	显著
因素 D( $U$ )	0.000 067	1	0.000 067	0.09	
因素 E( $Q_a$ )	0.001 473	1	0.001 473	2.02	
因素 F( $Q_l$ )	0.005 863	1	0.005 863	8.04	显著
A × B( $p_a \times p_l$ )	0.002 735	1	0.002 735	3.75	
A × C( $p_a \times D$ )	0.003 898	1	0.003 898	5.35	显著
B × C( $p_l \times D$ )	0.002 217	1	0.002 217	3.04	
模型	0.024 799	9	0.002 755	3.78	极显著
误差	0.012 399	17	0.000 729		
总和	0.037 198	26			

说明:  $p_a$  为气体压力;  $p_l$  为液体压力;  $D$  为喷孔直径;  $U$  为充电电压;  $Q_a$  为气体流量;  $Q_l$  为液体流量。 $F_{0.01}(1,17) = 8.40$ ,  $F_{0.05}(1,17) = 4.45$ ,  $F_{0.01}(9,17) = 3.68$ 。

表6 各因素对雾滴直径标准差的方差分析表

Table 6 Variance analysis of factor's effects on droplet diameter standard deviation

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	显著性
因素 A( $p_a$ )	6.853 8	1	6.853 8	32.2	极显著
因素 B( $p_l$ )	0.678 8	1	0.678 8	3.2	
因素 C( $D$ )	28.763 6	1	28.763 6	135.1	极显著
因素 D( $U$ )	1.070 3	1	1.070 3	5.0	显著
因素 E( $Q_a$ )	0.769 8	1	0.769 8	3.6	
因素 F( $Q_l$ )	0.486 5	1	0.486 5	2.3	
A × B( $p_a \times p_l$ )	2.304 0	1	2.304 0	10.8	极显著
A × C( $p_a \times D$ )	6.798 2	1	6.798 2	31.9	极显著
B × C( $p_l \times D$ )	0.941 3	1	0.941 3	4.4	
模型	48.666 3	9	5.407 4	25.4	极显著
误差	3.619 2	17	0.212 9		

说明:  $p_a$  为气体压力;  $p_l$  为液体压力;  $D$  为喷孔直径;  $U$  为充电电压;  $Q_a$  为气体流量;  $Q_l$  为液体流量。 $F_{0.01}(1,17) = 8.40$ ,  $F_{0.05}(1,17) = 4.45$ ,  $F_{0.01}(9,17) = 3.68$ 。

- [2] ALMEKINDERS H, OZKAN H E, REICHARD D L, *et al.* Spray deposit patterns of an electrostatic atomizer [J]. *Trans ASAE*, 1992, **36** (2): 321 – 325.
- [3] GAO L R, XIAN F S, ZHU H P, *et al.* Experiments on electrostatic spraying for pest control [J]. *Trans CSAM*, 1994, **25** (2): 1 – 10.
- [4] 任惠芳, 韩学猛, 王玉顺. 气力式静电喷头雾化特性研究[J]. 山西农业大学学报, 2003, **23** (2): 148 – 151.  
REN Huifang, HAN Xuemeng, WANG Yushun. Atomization properties of pneumatic energy electrostatic nozzle[J]. *J Shanxi Agric Univ*, 2003, **23** (2): 148 – 151.
- [5] 周浩生, 冼福生, 高良润. 组合电极双流体式静电喷雾技术[J]. 农业机械学报, 1996, **27** (2): 50 – 54.  
ZHOU Haosheng, XIAN Fusheng, GAO Liangrun. Research on combined-electrode twin-fluid nozzle electrostatic spraying technique[J]. *Trans Chin Soc Agr Mach*, 1996, **27** (2): 50 – 54.
- [6] 巴惠珍, 楚跃辉. 91WZ-250 型自走式超低量静电喷雾机[J]. 新疆农机化, 1997 (2): 19 – 20.  
BA Huizhen, CHU Yuehui. The 91WZ-250 ultra-low volume electrostatic charging spray machine [J]. *J Xinjiang Agric Mach*, 1997 (2): 19 – 20.
- [7] 闻建龙, 王军锋, 陈松山, 等. 荷电改善喷雾均匀性的实验研究[J]. 排灌机械, 2000, **13** (5): 45 – 47.  
WEN Jianlong, WANG Junfeng, CHEN Songshan, *et al.* Experimental research on electrostatic spraying at improving atomization[J]. *Irrig Drain Mach*, 2000, **13** (5): 45 – 47.
- [8] 周浩生. 荷电气-固两相流动理论及应用[D]. 镇江: 江苏理工大学, 1997.  
ZHOU Haosheng. *Electrostatic Gas-solid Two-phase Flow Theory and Application* [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 1997.
- [9] SHRIMPION J S. Dielectric charged drop break-up at sub-rayleigh limit conditions[J]. *IEEE*, 2005, **12** (3): 573 – 578.
- [10] LAW S E, BROWN H D. Effects of liquid conductivity upon gaseous discharge of droplets[J]. *IEEE*, 1989, **25** (6): 1073 – 1080.
- [11] 王军锋, 金哈辉, 王泽, 等. 微量静电喷洒灭蝗车的开发[J]. 江苏理工大学学报, 2001, **22** (1): 16 – 18.  
WANG Junfeng, JIN Hanhui, WANG Ze, *et al.* The development of electrostatic spraying car [J]. *J Jiangsu Univ Sci Technol*, 2001, **22** (1): 16 – 18.
- [12] 杨学军, 严荷荣, 徐赛章, 等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2002, **33** (6): 129 – 131.  
YANG Xuejun, YANG Herong, XU Saizhang, *et al.* Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2002, **33** (6): 129 – 131.
- [13] 罗惕乾, 王泽, 闻建龙, 等. 荷电两相流理论分析与计算[J]. 江苏理工大学学报, 2000, **21** (6): 50 – 53.  
LUO Tiqian, WANG Ze, WEN Jianlong, *et al.* Theoretic analysis and calculation of electrostatic charged two phase turbulence jet[J]. *J Jiangsu Univ Sci Technol*, 2000, **21** (6): 50 – 53.
- [14] 何雄奎, 曾爱军, 何娟. 果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J]. 农业工程学报, 2002, **18** (4): 75 – 77.  
HE Xiongkui, ZENG Aijun, HE Juan. Effect of wind velocity from orchard sprayer on droplet deposit and distribution [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2002, **18** (4): 75 – 77.
- [15] 何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 等. 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 Kerong, CHU Jinyu. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2003, **19** (6): 78 – 80.