

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.007

# 连续可变量喷雾系统响应特性试验\*

邱白晶 李坤 沈成杰 徐溪超 毛罕平

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 构建了以电动调节阀为变流器件的变量喷雾系统, 并采用试验方法得出了系统的阶跃响应特性, 试验结果表明: 在阶跃幅值  $\Delta Q$  分别为 0.4、1.4、3.4、3.9、4.4 L/min 条件下, 系统上升时间的最大值为 1 s, 表明系统响应速度与现有的调压变量喷雾系统相当; 系统上升时间、峰值时间和超调量都有幅值相关性, 说明系统是非线性系统。因此对此类调流变量喷雾系统, 其控制设计必须考虑非线性问题。

**关键词:** 喷雾 变量技术 响应特性 非线性 试验

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0032-04

## Experiment on Response Characteristics of Variable-rate Continuous Spraying System

Qiu Baijing Li Kun Shen Chengjie Xu Xichao Mao Hanping

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education &amp; Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

In order to develop a new type of precision spraying equipment, a set of variable-rate spray system based on electric control valve device as a converter was developed, and the step response characteristics of the system were studied by using experimental methods. The result shows that the maximum rise time is 1 s in the condition of step amplitude  $\Delta Q = 0.4, 1.4, 3.4, 3.9, 4.4$  L/min, which is comparable with variable-rate spray system controlled by changing flow press; the rise time, peak time and overshoot show correlation with the amplitude, which indicates that the system belongs to nonlinear system. So the control design of this type of variable-rate continuous spray system must take nonlinear problems into account.

**Key words** Spray, Variable-rate technology, Response characteristics, Nonlinear, Experiment

### 引言

变量喷雾技术是指喷量跟随目标信息的变化而实时调节的一类技术, 其基本要求是稳定、快速、准确<sup>[1]</sup>。按技术实现方式, 可把变量喷雾概括为3类: 调压变量喷雾、调流变量喷雾和药液浓度混合调节变量喷雾。调压变量喷雾是指调节药液压力实现喷量可变。Anglund E A 和 Aters P D 的试验表明<sup>[2]</sup>:

①调压变量喷雾的实测系统延时值为 1.5 s, 系统延时被规定为: 从系统发出调压指令时刻开始, 到喷头药液压力达到期望值的时间。②调压实际上是间接调流, 由于雾滴粒径谱与压力密切相关, 因此调压变量喷雾的流量调节范围不能大, 否则影响喷雾质量<sup>[3]</sup>。史岩和祁力钧等采用集中参数模型, 给出了一种调压变量喷雾系统的传递函数<sup>[4]</sup>。调流变量喷雾是指直接调节药液流量实现喷量可变。这方面

收稿日期: 2010-02-04 修回日期: 2010-04-09

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100905、2006AA10A305-3、2008AA100901)和国家自然科学基金资助项目(30571240)

作者简介: 邱白晶, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程及系统监测与控制研究, E-mail: qbji@ujs.edu.cn

的典型工作有 Giles D K<sup>[5]</sup>开发的脉宽调制(PWM)喷头及技术。PWM 喷头及技术的实质是通过调节喷头的启闭时间来调节喷雾流量。吴春笃和杜彦生等给出了沿喷杆长度方向和沿喷杆前进方向的雾量分布<sup>[6]</sup>。邓巍和丁为民等研究了 PWM 喷头及技术的流量调节范围、流量对雾滴粒径的影响和流量对喷雾角的影响<sup>[7-8]</sup>。药液浓度混合调节变量喷雾是指通过混药器实时改变药液浓度的喷雾方式。典型研究工作有 Paice M E R、Miller P C<sup>[9]</sup>和刘志壮、徐汉虹<sup>[10]</sup>针对药液浓度调节进行的混药器开发研究,以及 Gillis K P 和 Giles D<sup>[11]</sup>对混药器延时特性的研究,后者的试验表明<sup>[11]</sup>:药液浓度调节的系统时滞环节时间常数大于 12 s。

与已有 PWM 变量喷雾研究不同,本文研究基于连续变流器件的变量喷雾系统,讨论以电动调节阀为变流器件的变量喷雾系统响应特性,为提高喷雾量精度提供试验依据。

## 1 变量喷雾试验系统

### 1.1 系统结构

变量喷雾系统结构可以分为供液和调流两个子系统,如图 1 所示供液子系统由图 1 中标号 1~6 的部件构成,调流子系统由图 1 中标号 8~14 部件构成。试验发现如果把两子系统直接相连,将出现压力波动过大。因此在两子系统之间加装 Honey Well D06 型平衡减压阀。

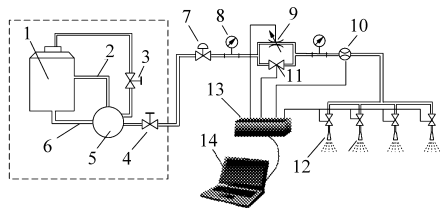


图 1 变量喷雾系统结构图

Fig. 1 Schematic of the variable-rate spray system

1. 药液箱 2. 自动卸荷泵溢流管 3. 自动卸荷泵回流调节阀
4. 自动卸荷泵供液调节阀 5. 自动卸荷泵 6. 自动卸荷泵进液管
7. 平衡减压阀 8. 压力表 9. 电动调节阀 10. 流量计
11. 电磁阀 12. 喷头 13. PLC 14. 计算机

调流子系统以 PLC 为核心。PLC 选用智达公司的 ePLC-24M 系列的可编程控制器,见图 1 所示部件 13。为了便于试验数据的采集及处理,系统配置了计算机作为上位机,见图 1 部件 14。电动调节阀选用中鼎阀业公司 V 型电动调节阀,其允许电压为 DC 2~10 V。流量计选用 LZDX-15 型智能金属管浮子流量计,其输出电流信号范围为 4~20 mA,量程 400 L/h。电磁阀选用 UD-CD 型开关电磁阀,控制电压信号为 DC 24 V。图 1 中共有 5 个电磁阀。

其中,与喷头相连的 4 个电磁阀用于系统调流试验时 4 个喷头的启闭,与电动调节阀相并联的电磁阀则在系统调流时处于关闭状态。

### 1.2 电动调节阀流量调节特性分析

电动调节阀的调流特性取决于阀芯的几何形状<sup>[9]</sup>。对于所用 V 型电动调节阀而言,其阀芯上开有 V 型槽。这种 V 型电动调节阀有两种阀芯装配关系,可以实现两种不同的调节特性。V 型槽小口先出的阀芯装配关系可以用过阀体球心的剖视图来表示,如图 2a 所示,图 2a 中的  $\theta$  代表阀芯转过的角度。图 2b 是与图 2a 对应的关于流通面积  $S$  的示意图,三角形代表阀芯开口,圆形代表阀体进液口,因此流通面积  $S$  就是图 2b 中三角形与圆形的交集。随着图 2a 转角  $\theta$  的增大,流通面积  $S$  增大,瞬时效果相当于图 2b 中三角形按图中箭头右移。随转角  $\theta$  的增大,变化率  $dS/d\theta$  也逐渐增大。通流面积  $S$  与流量成正比,因此流量调节特性可以由通流面积  $S$  随转角  $\theta$  的变化率  $dS/d\theta$  来表征。因此,当阀芯采取 V 型槽小口先出的装配关系时,流量随转角  $\theta$  的变化特性可定性由图 2c 中实线所代表的曲线来表示。同理可得,当阀芯采取 V 型槽大口先出的装配关系时,随转角  $\theta$  的增大,变化率  $dS/d\theta$  逐渐减小,因此,流量随转角  $\theta$  的变化特性由图 2c 中虚线所代表的曲线来表示。

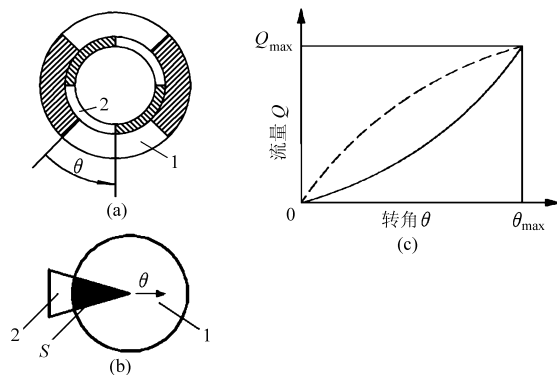


图 2 电动调节阀流量调节特性示意图

Fig. 2 Schematic of flow control characteristics in using electric control valve

(a) V 型槽小口先出阀芯剖视图 (b) V 型槽小口先出流通面积  $S$  示意图 (c) 流量随转角  $\theta$  变化曲线

1. 阀体进液口 2. 阀芯 V 型槽开口

通过引入模型参数  $\alpha$  和  $R$ ,可对图 2c 所示流量调节特性建模<sup>[12]</sup>

$$Q = \frac{1}{\rho R} (p_1 - p_2)^{1/\alpha} \quad (1)$$

式中  $Q$ ——流体流量  $\rho$ ——流体密度  
 $p_1, p_2$ ——电动调节阀入口和出口的流体压力  
 $\alpha, R$ ——模型参数,反映节流类型和流阻

虽然理论上得出参数  $\alpha \in [1, 2]$ , 而且设计手册也推荐了确定参数  $R$  的一些经验方法<sup>[13]</sup>。但实际工作中仍以试验建模确定参数  $\alpha$  和  $R$  最可靠<sup>[12]</sup>。

由于电动调节阀要放入图 1 所示系统中才能发挥作用, 因此从实用上考虑, 可以不单独对电动调节阀试验建模, 而采取对整个系统进行试验建模的策略。为此, 必须首先明确所讨论系统的物理量转换关系。

### 1.3 调流子系统物理量转换关系

图 1 反映的是喷雾系统物理连接。调流子系统中物理量之间的关系可用图 3 定性描述。

图 3 中的  $Z$  是指 PLC 的 D/A 转换器数字输入信号, 它来自图 1 中计算机。该信号经 PLC 的 D/A 转换器转换成电压  $V$ , 电动调节阀接收到电压  $V$  后, 其阀芯旋转到与电压  $V$  对应的角度  $\theta$ , 从而管路中流量调整到与  $\theta$  对应的流量  $Q$ 。图 3 中虚线表示监测流量的两种方式。量筒测量的是一时间段内的平均流量, 流量计可以测量瞬时流量。针对变量喷雾系统响应特性研究, 需选用流量计来实时获取瞬时流量值。图 3 所示流量计输出为电流  $I$ , 电流  $I$  经 PLC 的 A/D 转换器转换成数字输出量  $W$ 。

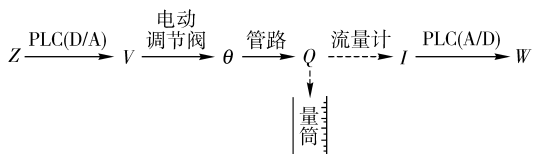


图 3 调流子系统物理量转换关系

Fig. 3 Physical variable conversion of flow subsystem

从图 3 中物理量关系的描述可知, 为使调流子系统用于调流变量喷雾试验, 必须解决两个试验标定问题。其一是试验标定出流量  $Q$  和 A/D 转换器转换器数字输出量  $W$  之间的关系, 目的是用于流量测定, 以下简称测流标定; 其二是试验标定出数字量  $Z$  和流量  $Q$  之间的关系, 目的是用于数字调流时的流量设定, 以下简称调流标定。

## 2 调流子系统标定

### 2.1 测流标定

图 4 给出了 PLC 的 A/D 转换器数字输出量  $W$  与流量  $Q$  关系的试验结果。设定的流量试验范围  $[0.5, 6]$ 。  $W$  对  $Q$  的回归方程为

$$W = 122.09Q + 192.64 \quad (2)$$

### 2.2 调流标定

由于 V 型电动调节阀存在初始工作电压和饱和电压, 因此 PLC 的 D/A 转换器数字输入  $Z$  的有效区间是有限的。在系统压力为 0.5 MPa 条件下, 实测  $Z$  的有效取值范围为  $Z \in [101, 133]$ 。当 PLC

的 D/A 转换器数字输入  $Z < 101$  时, 系统流量为零, 即系统的初始工作点为  $Z = 101$ 。当 PLC 的 D/A 转换器数字输入  $Z > 133$  时, 系统流量不能再调高, 即系统达到饱和点。因此, 只需在  $Z \in [101, 133]$  范围内进行标定。

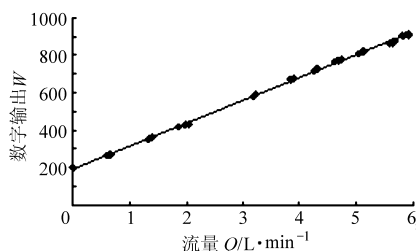


图 4 PLC 的 A/D 转换器数字输出  $W$  与流量  $Q$  的关系

Fig. 4 Digital output  $W$  of A/D converter in PLC vs flow rate  $Q$

具体试验标定条件为: ①喷头选用农业部南京农业机械化研究所提供的 N60 型标准扇形喷头, 试验流体选用清水。②试验安排 PLC 的 D/A 转换器数字输入  $Z \in [101, 133]$ , 步长  $h = 1$ , 分别按从小到大和从大到小设置  $Z$ 。③设系统工作压力 0.5 MPa, 待系统稳定后对系统流量进行测定。

标定结果如图 5。从图 5 可知, 调流标定存在回程误差, 而且不宜用直线来表达  $Z$  与  $Q$  的关系。故选用 2 次多项式回归, 得到流量  $Q$  与 PLC 的 D/A 转换器数字输入  $Z$  的回归方程为

$$Q = -0.0045Z^2 + 1.21Z - 75.924 \quad (3)$$

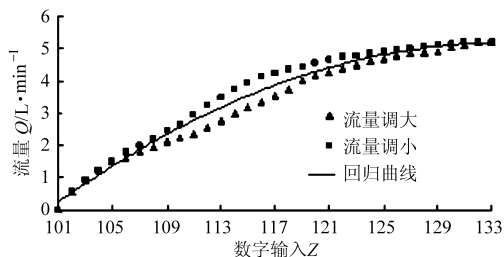


图 5 流量  $Q$  与 PLC 的 D/A 转换器数字输入  $Z$  关系

Fig. 5 Flow rate  $Q$  vs digital output  $Z$  of A/D converter in PLC

## 3 调流变量喷雾系统阶跃响应

确定系统响应特性的典型试验方法有阶跃响应法、脉冲响应法和正弦响应法等<sup>[13]</sup>。控制工程中已对阶跃响应定义了系统性能指标, 故选用阶跃响应法来确定系统响应特性。

### 3.1 试验设计

#### 3.1.1 试验固定因子

喷头和试验流体与 2.2 节调流标定时相同, 从而保证阶跃响应试验与调流标定试验有一致的基本工作条件。设定每次阶跃调流前的稳定工作点为:

工作流量 0.6 L/min,工作压力 0.5 MPa。目的是使不同的阶跃有共同的起点,从而方便试验结果的比较。

### 3.1.2 试验变化因子

由图 2c 可知,电动调节阀流量调节特性存在非线性,故采用不同的阶跃幅值来考察系统响应特性是否存在非线性。具体试验安排如下:阶跃目标流量取 5 种水平  $Q = 1.0、2.0、4.0、4.5、5.0$  L/min,对应阶跃幅值为  $\Delta Q = 0.4、1.4、3.4、3.9、4.4$  L/min。

### 3.2 试验结果与分析

在阶跃调流前稳定工作点流量和压力设定为 0.6 L/min 和 0.5 MPa 条件下,按 5 种目标流量  $Q = 1.0、2.0、4.0、4.5、5.0$  L/min 实测阶跃响应如图 6 所示。尽管实际采样总时间为 30 s,但为清楚起见,只图示了前 5 s 的流量采样结果,理由是 5 s 后的流量已进入稳态区。

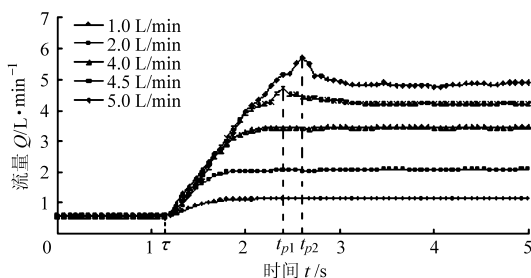


图 6 5 种阶跃调流幅值下的流量响应

Fig. 6 Flow response of flow rate with five step amplitudes

用纯时滞环节时间、上升时间、峰值时间和超调量共 4 项性能指标来表征系统阶跃响应特征。在这 4 个性能指标中,现有文献对纯时滞环节时间、峰值时间和超调量的定义是一致的,但对上升时间的定义不完全一致<sup>[12]</sup>。此处上升时间定义为响应曲线从稳态值的 10% 到稳态值的 90% 所需的时间<sup>[12]</sup>,此定义便于使试验结果与 Anglund E A 和 Aters P D 的试验结果相比较<sup>[2]</sup>。图 6 中标记  $\tau$  为纯时滞环节时间, $t_{p1}$  和  $t_{p2}$  分别为目标流量 4.5 L/min 和 5 L/min 时的阶跃响应峰值时间。从图 6 所得 4 项性能指标归纳见表 1。

从图 6 所标记  $\tau$  的取值来看,5 种阶跃响应下

表 1 阶跃响应性能指标

Tab. 1 Index of step-response performance

目标流量 /L·min <sup>-1</sup>	时滞环节 时间 $\tau$ /s	上升时间 $t_r$ /s	峰值时间 $t_p$ /s	超调量 $M_p$ /%
1.0	1.13	0.3		
2.0	1.13	0.5		
4.0	1.13	0.8		
4.5	1.13	1.0	1.4	12
5.0	1.13	1.0	1.6	17

均有稳定的  $\tau$  值,这是系统存在纯时滞环节的显著标志。因此在表 1 中直接用时滞环节时间  $\tau$  来表达系统纯时滞环节。从表 1 可知,上升时间随阶跃幅值的增加而增加,在阶跃幅值  $\Delta Q = 0.4、1.4、3.4、3.9、4.4$  L/min 的条件下,上升时间的最大值为 1 s,说明基于电动调节阀的连续变量喷雾系统与现有调压变量喷雾系统的响应速度相当。从系统上升响应时间、峰值时间和超调量 3 个指标看,都有幅值相关性。这种幅值相关性是线性系统所不具备的,因此系统为非线性系统。对此类以电动调节阀为变流器件的调流变量喷雾系统,其控制方案和控制系统设计均必须考虑非线性问题。

## 4 结论

(1) 基于电动调节阀的连续变量喷雾系统含有纯时滞环节,纯时滞环节时间  $\tau = 1.13$  s。

(2) 变量喷雾系统上升时间与阶跃幅值有关,阶跃幅值越大,上升时间的数值越大。在 5 种阶跃幅值  $\Delta Q$  分别为 0.4、1.4、3.4、3.9、4.4 L/min 条件下,上升时间的最大值为 1 s,说明基于电动调节阀的连续变量喷雾系统与现有调压变量喷雾系统的响应速度相当。

(3) 系统上升时间、峰值时间和超调量 3 个方面都有幅值相关性,表明系统为非线性系统。因此,对此类以电动调节阀为变流器件的调流变量喷雾系统,其控制设计必须考虑非线性问题。

## 参 考 文 献

- 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 it's key technology[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2004,25(2):97~101. (in Chinese)
- Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003,19(3):273~282.
- 邓巍,何雄奎,丁为民. 基于压力变量喷雾的雾化特性及其比较[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(6):545~548.  
Deng Wei, He Xiongkui, Ding Weimin. Characteristics and comparison of pressure-based variable spray[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2009,30(6):545~548. (in Chinese)

28(4):280~283.

Zhu Zhaolong, Sun Yurui, Ma Daokun, et al. An instrument for simultaneous measurement of soil water content and compaction[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2007, 28(4): 280~283. (in Chinese)

- 7 邵玲,林剑辉,孙宇瑞. 农田土壤含水率与坚实度快速信息采集系统[J]. 农机化研究,2007,29(2):83~86.

Shao Ling, Lin Jianhui, Sun Yurui. Quick measuring system for soil water content and soil hardness [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(2): 83~86. (in Chinese)

- 8 王凤花,张淑娟. 基于精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报,2008,39(5):112~121,111.

Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):112~121,111. (in Chinese)

- 9 王凤花,介邓飞,赵华民,等. 基于GPS-OEM的田间信息采集仪定位精度分析[J]. 农机化研究,2009,31(6):135~136,144.

Wang Fenghua, Jie Dengfei, Zhao Huamin, et al. Accuracy analysis on positioning accuracy of field information acquisition equipment based on GPS-OEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31 (6): 135 ~ 136, 144. (in Chinese)

- 10 王凤花. 农田信息采集与处理关键技术及设备的研究[D]. 太谷:山西农业大学,2009.

Wang Fenghua. Study on field information acquisition and processing key technology and instrument [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2009. (in Chinese)

- 11 张小超,王一鸣,方宪法,等. 精准农业的信息获取技术[J]. 农业机械学报,2002,33(6):125~128.

Zhang Xiaochao, Wang Yiming, Fang Xianfa, et al. Information acquisition techniques of precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6):125~128. (in Chinese)

(上接第35页)

- 4 史岩,祁力钧,傅泽田,等. 压力式变量喷雾系统建模与仿真[J]. 农业工程学报,2004,20(5):118~121.

Shi Yan, Qi Lijun, Fu Zetian, et al. Model development and simulation of variable rate of pressure spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(5):118~121. (in Chinese)

- 5 Giles D K, Henderson G W, Funk K. Digital control of flow rate and spray droplet size from agricultural nozzles for precision chemical application[C]//Precision Agriculture, Proc.3rd Int. Conference, 1996: 729~738.

- 6 吴春笃,杜彦生,张伟,等. 脉宽调制型变量喷雾系统雾量沉积分布[J]. 农业机械学报,2007,38(12):70~73.

Wu Chundu, Du Yansheng, Zhang Wei, et al. Study on the deposit distribution of the modulated variable rate spray system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(12):70~73. (in Chinese)

- 7 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 it's spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(6):77~80. (in Chinese)

- 8 邓巍,丁为民. 基于PWM间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报,2009,40(1):74~78.

Deng Wei, Ding Weimin. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):74~78. (in Chinese)

- 9 Paice M E R, Miller P C, Bodle J D. An experimental prayer for the spatially selective application of Herbicide[J]. Journal of Agriculture Engineering Research,1995,60(2): 107~116.

- 10 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)

- 11 Gillis K P, Giles D Ken, Slaughter David C, et al. Injection and fluid handling system for machine-vision controlled spraying [C]//2001 ASAE Annual Meeting, Paper 011114, 2001.

- 12 Franklin Gene F, Powell J David, Emami-Naeini Abbas. Feedback control of dynamic systems[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

- 13 “阀门管件设计”编译组. 美国阀门管件设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1984.

- 14 邱白晶,李佐鹏,吴昊,等. 变量喷雾装置响应性能的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):148~152.