

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.010

# 基于卡尔曼滤波的 PWM 变量喷雾控制研究\*

蒋焕煜 周鸣川 童俊华 刘岩

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

**摘要:** 构建了一套可采集测量喷头喷雾压力数据的 PWM 变量喷雾实验平台,通过喷头压力与流量关系特性,经卡尔曼滤波算法得出喷雾瞬时流量数据,并对其积分得到喷雾流量。设计了一种自动分段线性拟合方法将滤波后得到的喷雾流量与 PWM 信号占空比相关联,最终建立 PWM 喷雾流量模型。在喷雾压力为 0.2、0.3 和 0.4 MPa 条件下,对各喷雾流量模型进行喷雾流量控制精度实验,实验表明 3 种压力条件下所建立的 PWM 喷雾流量模型决定系数  $R^2$  均在 0.995 以上,喷雾流量控制误差在  $\pm 6\%$  范围内,说明该方法可以为快速、在线建立喷雾控制模型提供参考。

**关键词:** 变量喷雾 脉宽调制 卡尔曼滤波 分段线性拟合

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0060-06

## 引言

变量喷雾施药是减少植保作业中药液使用量的重要技术手段<sup>[1-2]</sup>。变量喷雾施药可以通过变喷雾时间和变喷雾压力两种途径实现,变喷雾压力方法在改变喷雾流量的同时也改变了雾滴粒径及雾滴分布,因此应用受到局限。变喷雾时间实现方式有变作业速率与运用 PWM 技术调节电磁阀两种,其中作业速率往往受到其他因素局限调节不便,而运用 PWM 技术调节电磁阀实现流量控制对喷雾粒径影响不大<sup>[3-4]</sup>,因此该技术已成为实现变流量喷雾的重要手段<sup>[5-6]</sup>。应用 PWM 技术进行喷雾流量控制,喷雾流量模型是必不可少的。Lebeau 等<sup>[7]</sup>在某一确定压力和固定频率下使用线性方程对喷头特性进行了描述,刘大印等<sup>[8]</sup>通过正交组合设计方法建立了喷雾压力、PWM 信号占空比和流量的关系模型,翟长远等<sup>[9]</sup>通过二次回归正交组合设计建立了针对指定喷头的喷雾压力、PWM 信号频率、PWM 信号占空比和流量的回归方程,魏新华等<sup>[10]</sup>针对指定喷头分析了包括压力泵转速、喷头位置、喷雾压力等多个因素对喷雾流量的影响,建立了在不同压力下 PWM 信号占空比与喷雾流量的关系。这些研究方法完成的喷雾流量模型已经达到较高的控制精度,但是在规模化生产装备及田间喷雾作业中,快速、在线完成针对某种电磁阀与喷头组合的流量模型方面

还需要进一步完善。

依据在指定流体、喷头参数情况下,喷头喷雾流量与压力的平方根呈正比例关系这一特性<sup>[11]</sup>,本文通过卡尔曼滤波将采集的喷头瞬时喷雾压力推导出喷雾流量,并设计自动分段线性拟合方法建立 PWM 信号占空比与喷雾流量关系,通过喷雾流量控制精度实验来验证该模型的准确性,从而为快速、在线建立喷雾控制模型提供参考。

## 1 PWM 变量喷雾实验平台

设计的 PWM 变量喷雾实验平台的总体结构如图 1 所示。

实验平台由供压稳压单元、流量调节单元、信号采集单元和 PWM 控制单元构成。其中供压稳压单元包括药箱、电动机、三缸柱塞泵、蓄能器、压力表、安全阀和喷头。二相交流电动机(YL112M-4 型,台州大地机械有限公司)驱动三缸柱塞泵(DA-45A 型,台州大地机械有限公司)将液体从药箱中抽出,三缸柱塞泵上组装的调压式溢流阀可实现压力调节,经调压后的液体通过蓄能器(NXQ-4-10 型,丹阳市宏达蓄能器有限公司)吸震稳压后由喷头(H-VV9515 型,美国喷雾公司)喷出,系统压力可由数显压力表(PST-H 型,上海天贺自动化仪表有限公司)观察,为了保障系统安全可靠工作,加装安全阀(DSSV-4S 型,青岛东石机电设备有限公司)保证

收稿日期: 2013-11-05 修回日期: 2013-12-26

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A504)、农业部引进国际先进农业科学技术资助项目(2011-G32)和浙江省“新世纪 151 人才工程”资助项目

作者简介: 蒋焕煜,教授,博士生导师,主要从事农业自动化装备研究,E-mail: hyjiang@zju.edu.cn

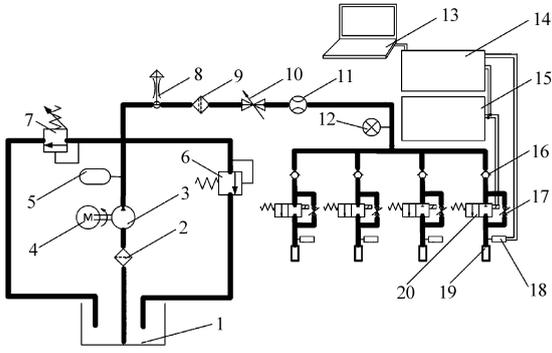


图 1 PWM 变量喷雾实验平台

Fig. 1 Experiment platform of PWM variable spray

1. 药箱 2. 过滤器 3. 三缸柱塞泵 4. 电动机 5. 蓄能器 6. 安全阀 7. 调压溢流阀 8. 排气阀 9. 精细过滤器 10. 大球阀 11. 数显涡轮流量计 12. 数显压力计 13. 计算机 14. 信号采集单元 15. PWM 控制单元 16. 单向阀 17. 小球阀 18. 压力传感器 19. 喷头 20. 电磁阀

喷头组件工作压力在 1 MPa 以下。流量调节单元由直动高速电磁阀和压力传感器组成。高速电磁阀 (ZCB 型, 重庆柯思阀门有限公司) 流体出口处安装压力传感器 (WMB2012-HS 型, 杭州焯立工控有限公司), 其压力信号响应时间为  $5 \mu\text{s}$  满足压力实时采集要求。

PWM 控制单元核心为 STC80C52 单片机, LCD1026A 显示模块及  $4 \times 4$  按键作为单片机的输出与输入模块。单片机生成的 PWM 控制信号由 TLP521-1 光耦进行信号隔离放大, 驱动 TIP142 场效应管, 电路图如图 2 所示。信号采集单元由采样电阻及示波器组成, 将 24 V 直流电源与压力传感器及采样电阻串联, 采样电阻两端电压由示波器 (TDS1002B-SC 型, Tektronix 泰克有限公司) 的一个通道获得, 示波器另一个通道与单片机产生 PWM 控制信号管脚相连, 为减少外界干扰, 回路连接采用屏蔽线。

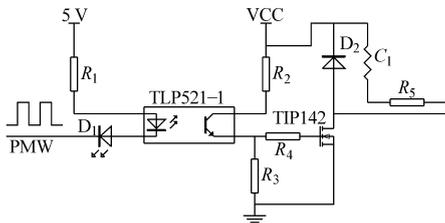


图 2 PWM 信号控制电磁阀电路

Fig. 2 PWM signal control solenoid valve circuit

实验时, 调整示波器扫描时间为每格 1 ms, 采集压力传感器的输出电压信号及下位机控制电磁阀的电平信号, 设定系统压力值并通过溢流阀调压手轮调节, 调整完毕后锁紧调节手轮。由  $4 \times 4$  按键设定 PWM 信号频率及占空比发送指令给下位机, 待示波器波形显示稳定后, 通过计算机获取其波形数据并

保存。

## 2 基于卡尔曼滤波的喷雾流量计算

采用喷头喷雾施药时, 药液流量与压力的平方根、药液流体性质及喷头的几何形状参数呈比例, 因喷雾作业过程中喷雾药液及所用喷头固定不变, 因此可得

$$q/\sqrt{p} = C \quad (1)$$

式中  $q$ ——喷头瞬时流量, L/min

$p$ ——喷雾压力, MPa

$C$ ——喷头流量系数, L/(min·MPa<sup>1/2</sup>)

### 2.1 卡尔曼滤波

要获得准确的瞬时流量则必须获得可靠的压力数据。虽然在压力数据采集过程中有屏蔽线等防干扰措施, 但仍避免不了噪声混入, 通过卡尔曼滤波方法可以获得更为可靠的压力数据<sup>[12-13]</sup>。

建立的喷雾流量模型为

$$q_{k+1} = q_k + C(\sqrt{p_k} + \sqrt{p_{k+1}}) dt/2 \quad (2)$$

其中

$$p_k = 4(u_k - 1)$$

代入式(2)得到

$$q_{k+1} = q_k + C(\sqrt{u_k - 1} + \sqrt{u_{k+1} - 1}) dt \quad (3)$$

采样电压  $u$  与压力  $p$  之间关系为

$$p = p_m(u - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}) \quad (4)$$

式中

$u$ ——示波器采集的采样电阻两端电压, V

$p_m$ ——压力传感器测试量程值, MPa

$V_{\min}$ ——压力传感器无外压时采样电阻输出电压, V

$V_{\max}$ ——压力传感器的量程最大值时采样电阻两端电压, V

选取的压力传感器量程为 0 ~ 1.5 MPa, 输出电流为 4 ~ 20 mA, 采样电阻为 250  $\Omega$ , 因此取  $p_m = 1.5 \text{ MPa}$ ,  $V_{\min} = 1 \text{ V}$ ,  $V_{\max} = 5 \text{ V}$ 。

获取系统状态变量

$$\mathbf{X} = \mathbf{u} \quad (5)$$

状态方程为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \quad (6)$$

式中  $\mathbf{A}$ ——状态转移矩阵, 由于系统压力不变取

$$\mathbf{A} = 1$$

$\mathbf{W}_k$ ——协方差为  $\mathbf{Q}$  的系统噪声

系统测量方程为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (7)$$

式中  $\mathbf{H}$ ——系统测量方程, 取  $\mathbf{H} = 1$

$\mathbf{V}_k$ ——协方差为  $\mathbf{R}$  的测量噪声

(1) 滤波初始化

假设系统初始压力为  $p_0$ , 估计值方差为  $P_0$ 。

## (2) 预测

$$\mathbf{X}_{k+1,k} = \mathbf{X}_{k,k} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{X}_{k+1,k}$ ——由  $k$  时刻预测  $k+1$  时刻值

$\mathbf{X}_{k,k}$ —— $k$  时刻的最优估计值

$$\mathbf{P}_{k+1,k} = \mathbf{P}_k + \mathbf{Q} \quad (9)$$

式中  $\mathbf{P}_{k+1,k}$ —— $k+1$  时刻预测值方差

$\mathbf{P}_k$ —— $k$  时刻估计值方差

## (3) 更新

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1,k} / (\mathbf{P}_{k+1,k} + \mathbf{R}) \quad (10)$$

式中  $\mathbf{K}_{k+1}$ —— $k+1$  时刻的卡尔曼增益

$$\mathbf{X}_{k+1,k+1} = \mathbf{X}_{k+1,k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{X}_{k+1,k}) \quad (11)$$

式中  $\mathbf{X}_{k+1,k+1}$ —— $k+1$  时刻系统的估计值

系统的  $k+1$  时刻估计值方差为

$$\mathbf{P}_{k+1,k+1} = \mathbf{P}_{k+1,k} (1 - \mathbf{K}_k) \quad (12)$$

## 2.2 瞬时流量卡尔曼滤波效果验证

为了验证滤波效果,在所构建的 PWM 变量喷雾实验平台上进行定压喷雾,对滤波前、后的数据进行采集验证。关闭电磁阀控制电路,开启小球阀,调节溢流阀维持管路压力  $p$  为 0.2 MPa,通过示波器采集压力传感器数据,喷头流量系数  $C$  为  $1.07 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{MPa}^{1/2})$ ,采集一组 PWM 信号占空比及对应瞬时流量数据仅耗时 2 s,滤波前、后喷雾瞬时流量变化如图 3 所示。

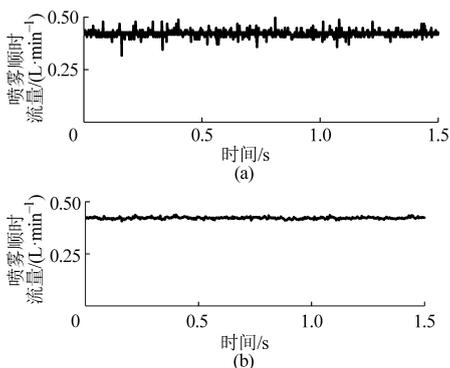


图3 喷雾瞬时流量数据滤波前、后对比

Fig.3 Comparison of spray flow rate data before and after filtering

(a) 滤波前 (b) 滤波后

在上述实验条件下,启动电磁阀控制电路,关闭小球阀。考虑到 PWM 信号频率对喷雾流量变化影响不大且使电磁阀能有足够时间完成开闭动作保持正常响应<sup>[10]</sup>,设置 PWM 信号频率参数  $f$  为 2 Hz,占空比  $d$  为 20%,滤波前、后 PWM 信号电压与喷雾瞬时流量变化结果如图 4 所示。

从图中看出,喷雾瞬时流量响应滞后于电平变化,这与实际情况是基本吻合的。当 PWM 信号为高电平,场效应管打开电磁阀得电,线圈励磁克服弹簧阻力打开阀芯。当 PWM 信号为低电平,场效应

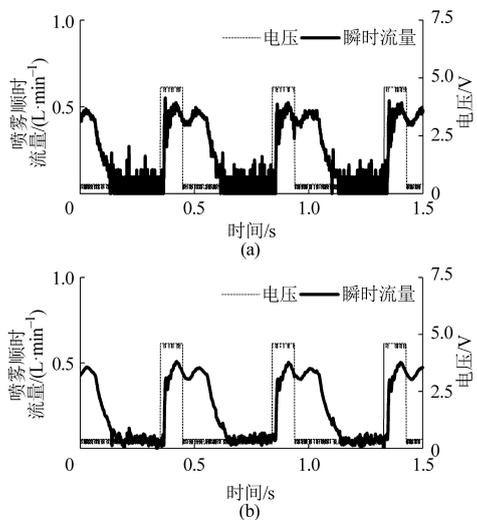


图4 PWM 控制信号电压与喷雾瞬时流量变化结果

Fig.4 Relation between voltage of PWM control signal and instantaneous spray flow rate

(a) 滤波前 (b) 滤波后

管关闭,线圈自感续流直至线圈对阀芯的吸力小于弹簧力,阀芯关闭。因此电磁阀开启持续时间大于 PWM 信号置高电平持续时间,且电磁阀开启及关闭动作总是滞后于 PWM 信号变化。

喷雾瞬时流量随电磁阀动作发生周期性变化,可以由喷雾瞬时流量经梯形积分后得到喷雾流量

$$q_m = \int q dt / T \quad (13)$$

式中  $T$ ——脉冲周期, s

测量不同占空比下的喷雾瞬时流量数据可以建立喷雾流量控制模型,设置 PWM 信号频率为 2 Hz,在 0.2、0.3 和 0.4 MPa 喷雾压力条件下, PWM 信号占空比以 10% 为步长,在 10% ~ 100% 范围内进行实验。将 PWM 信号占空比从 1% 调节到 10%,发现 PWM 信号占空比为 4% 时电磁阀才能完成一次完整的吸合动作,因此可以将该占空比作为流量调节下限。在各实验压力条件下, PWM 信号占空比与喷雾流量实验结果如表 1 所示。

表1 不同喷雾压力下喷雾流量实验结果

Tab.1 Experimental results of spray flow rate under different spray pressure L/min

占空比/%	压力/MPa		
	0.2	0.3	0.4
4	0.180	0.197	0.215
10	0.199	0.225	0.266
20	0.229	0.286	0.324
30	0.262	0.336	0.387
40	0.316	0.391	0.453
50	0.353	0.437	0.506
60	0.399	0.477	0.550
70	0.406	0.528	0.597
80	0.419	0.563	0.629
90	0.421	0.567	0.652
100	0.421	0.566	0.659

从数据中可以看出,在相同 PWM 信号占空比条件下,喷雾压力变化对喷雾流量有较大影响。喷雾流量随 PWM 信号占空比增大而增大,当 PWM 信号占空比增大到一定值时,喷雾流量基本稳定。

### 3 喷雾流量自动分段线性拟合

对 0.2、0.3 和 0.4 MPa 喷雾压力条件下的 PWM 信号占空比与喷雾流量数据进行拟合,从而建立基于 PWM 信号占空比的喷雾流量控制模型。由于喷雾流量与 PWM 信号占空比存在明显分段线性关系,可采用分段线性拟合方法进行拟合建模<sup>[14-15]</sup>。

分段拟合第一段函数选择为

$$q_m = kd + b \quad (14)$$

第二段函数选择为

$$q_m = c \quad (15)$$

将所有实验点集合  $M$  分为 2 个集合  $M_1$ 、 $M_2$ ,其中  $M_1$  对应第一段函数, $M_2$  对应第二段函数,实现数据点的自动分段拟合过程如下:

(1) 初始时令集合  $M_1 = M$ ,  $M_2$  为空集。

(2) 通过最小二乘法,由实验点集合  $M_1$  拟合确定第一段函数参数( $M_1$  空集时无需计算),由实验点集合  $M_2$  拟合确定第二段函数参数( $M_2$  空集时无需计算),计算该方案下分段模型的  $R^2$  值。

(3) 将实验点  $M_1$  中最大 PWM 控制信号占空比实验点数据移入  $M_2$  中,重复步骤(2)直至  $M_1$  为空集时停止,输出所有方案中决定系数  $R^2$  最大的模型作为最佳拟合方案。

在 0.2 MPa 喷雾压力,2 Hz 的 PWM 信号频率下,通过自动分段线性拟合方法处理结果如图 5 所示,得到 PWM 占空比与喷雾流量的函数关系为

$$q_{0.2} = \begin{cases} 0.003\ 936d + 0.156\ 5 & (4 \leq d \leq 66) \\ 0.416\ 8 & (66 < d \leq 100) \end{cases}$$

式中  $q_{0.2}$ ——压力为 0.2 MPa 下的喷雾流量, L/min

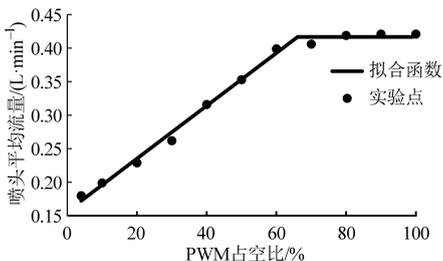


图 5 0.2 MPa 喷雾压力下拟合效果验证

Fig. 5 Verification effect of piecewise linear model under spray pressure of 0.2 MPa

模型的决定系数  $R^2$  为 0.995,喷雾流量控制范围为 0.172 2 ~ 0.416 8 L/min。

0.3 MPa 喷雾压力下,通过自动分段线性拟合方法处理结果如图 6 所示,PWM 信号占空比与喷雾流量的函数关系为

$$q_{0.3} = \begin{cases} 0.004\ 885d + 0.184\ 6 & (4 \leq d \leq 78) \\ 0.566\ 5 & (78 < d \leq 100) \end{cases}$$

式中  $q_{0.3}$ ——压力为 0.3 MPa 下的喷雾流量, L/min

模型的决定系数  $R^2$  为 0.999,喷雾流量控制范围为 0.204 2 ~ 0.566 5 L/min。

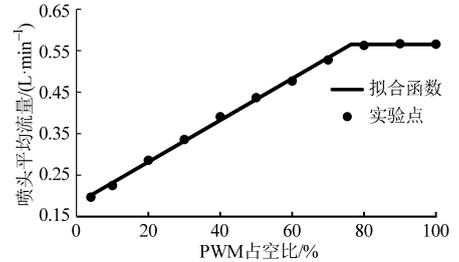


图 6 0.3 MPa 喷雾压力下拟合效果验证

Fig. 6 Verification effect of piecewise linear model under spray pressure of 0.3 MPa

0.4 MPa 喷雾压力下,通过自动分段线性拟合方法处理结果如图 7 所示,PWM 占空比与喷雾流量的函数关系为

$$q_{0.4} = \begin{cases} 0.005\ 781d + 0.207\ 0 & (4 \leq d \leq 76) \\ 0.646\ 7 & (76 < d \leq 100) \end{cases}$$

式中  $q_{0.4}$ ——压力为 0.4 MPa 下的喷雾流量, L/min

模型的决定系数  $R^2$  为 0.995,喷雾流量控制范围为 0.230 1 ~ 0.646 7 L/min。

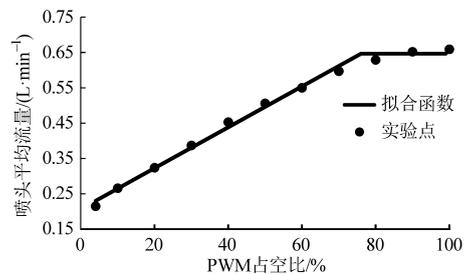


图 7 0.4 MPa 喷雾压力下拟合效果验证

Fig. 7 Verification effect of piecewise linear model under spray pressure of 0.4 MPa

## 4 流量模型实验验证

通过喷雾流量控制精度实验来验证该流量模型的准确性,具体实验过程如下:将系统压力先后设置为 0.2、0.3 和 0.4 MPa,设置喷雾目标平均流量为 0.25、0.30 和 0.40 L/min,在每一种压力和流量的组合条件下,通过流量控制模型计算对应条件下的占空比  $d$ ,并生成对应 2 Hz 的 PWM 信号控制电磁阀动作,在连续 60 s 内用清洁干燥的烧杯截获喷头喷出的雾滴,用精度为  $\pm 0.1$  g 的电子秤(余姚市金诺天平有限公司 TD21001 型)称测烧杯实验前、后

质量获得实际流量。为了提高测量实际流量的精度,通过单片机定时器来控制电磁阀的开启与关闭,实验结果如表2所示。分析实验数据可以得到,喷雾流量控制误差在 $\pm 6\%$ 范围内。在相同的实验条件下,小流量控制精度一般要低于大流量控制精度。这是由于在相同实验条件下,压力波动是相当的,由

表2 喷雾流量控制精度测试结果

Tab.2 Results of spray flow rate control accuracy test

压力/ MPa	目标流量/ ( $L \cdot \min^{-1}$ )	实际流量/ ( $L \cdot \min^{-1}$ )	误差/ %	占空 比/%
0.2	0.25	0.264	4.0	24
0.2	0.30	0.285	-5.3	36
0.2	0.40	0.406	1.2	62
0.3	0.25	0.265	5.7	13
0.3	0.30	0.312	3.8	24
0.3	0.40	0.389	-2.8	44
0.4	0.25	0.240	-4.2	7
0.4	0.30	0.305	-1.7	16
0.4	0.40	0.423	-5.4	33

此产生的流量波动也是相当的,在喷雾流量较大的情况下,这种波动对喷雾流量影响相对较小。

## 5 结论

(1) 通过喷雾压力数据计算的喷雾流量模型能够将电磁阀响应因素考虑在内,可直观地分析出电磁阀及其控制方案性能。

(2) 卡尔曼滤波技术能够提高压力传感器的软性能,设计的自动分段线性拟合方法所建立的 PWM 喷雾流量模型  $R^2$  均大于 0.995,说明该方法能有效完成数据自动分析并生成流量控制模型。

(3) 经实验表明,喷雾流量控制误差在 $\pm 6\%$ 范围以内,由于压力波动对小流量喷雾影响相对较大,因此在相同喷雾压力下小流量控制精度一般要低于大流量控制。

(4) 提出的基于卡尔曼滤波的 PWM 变量喷雾控制方法能够实现快速数据采集并自动拟合建模,可以为快速、在线的实现喷雾流量控制模型建立提供参考。

## 参 考 文 献

- 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13 - 15.  
He Xiongkui. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 13 - 15. (in Chinese)
- Loghavi M, Behzadi Mackvandi B. Development of a target oriented weed control system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 112 - 118.
- Unavut J K, Schueller J K, Mason P A C. Continuous control of a sprayer pinch valve[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 829 - 837.
- Guzman J L, Rodriguez F, Sanchez-Hermosilla J, et al. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2): 715 - 727.
- 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 its spray characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 77 - 80. (in Chinese)
- Escolà A, Rosell-Polo J R, Planas S, et al. Variable rate sprayer. Part 1—orchard prototype: design, implementation and validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95: 122 - 135.
- Lebeau F, El Bahir L, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(2): 149 - 161.
- 刘大印, 王秀, 毛益进, 等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 99 - 103.  
Liu Dayin, Wang Xiu, Mao Yijin, et al. Study on PWM variable pesticide spraying control system based on MCU[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 99 - 103. (in Chinese)
- 翟长远, 王秀, 密雅荣, 等. PWM 变量喷雾喷头流量模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40 - 44.  
Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yarong, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40 - 44. (in Chinese)
- 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87 - 92.  
Wei Xinhua, Jiang Shan, Zhang Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 44(2): 87 - 92. (in Chinese)
- Giles D K, Ben-Salem E. Spray droplet velocity and energy in intermittent flow from hydraulic nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 51: 101 - 112.
- 沈法鹏, 赵又群, 林菜. 基于卡尔曼滤波的车辆侧偏角软测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 71 - 75.  
Shen Fapeng, Zhao Youqun, Lin Fen. Soft sensor of vehicle side slip angle based on Kalman filter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 71 - 75. (in Chinese)
- 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.

- 14 李颖慧, 李民赞, 邓小蕾, 等. 基于无线传感器网络的温室栽培营养液电导率监测系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 170 - 177.  
Li Yinghui, Li Minzan, Deng Xiaolei, et al. Monitoring system for electrical conductivity of greenhouse nutrient solutions based on WSN[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 170 - 177. (in Chinese)
- 15 闫秋艳, 夏士雄. 一种无限长时间序列的分段线性拟合算法[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 443 - 448.  
Yan Qiuyan, Xia Shixiong. An piecewise linear fitting algorithm for infinite time series[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(2): 443 - 448. (in Chinese)

## PWM Variable Spray Control Based on Kalman Filter

Jiang Huanyu Zhou Mingchuan Tong Junhua Liu Yan

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** A platform was built up to collect the pressure data near the nozzle. The instantaneous flow data was calculated based on the relationship between pressure and flow by using Kalman filtering algorithm, and the average spray flow rate was obtained by integrating over the instantaneous flow, then an automatic piecewise linear fitting method was designed after considering the relationship between the duty cycle of PWM signal and the average spray flow rate. In order to verify the control effects of the spray flow rate model, the PWM spray flow rate models based on Kalman filtering were established under the spray pressure of 0.2, 0.3 and 0.4 MPa, respectively, and the experiments of spray flow rate control accuracy were performed under the same conditions. The results showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) in the models above were all more than 0.995 under the three spray pressures, and the spray flow rate control error was within  $\pm 6\%$ . This method provides a reference of building spraying control model for rapid and online use.

**Key words:** Variable spray Pulse width modulation Kalman filtering Piecewise linear fitting

(上接第 115 页)

## Design and Experiment of Rotary Converter of Liquid Fertilizer

Wang Jinwu Pan Zhenwei Yang Xinlun Liu Yongjun Zhang Chunfeng Wang Jinfeng

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** There are a lot of problems in deep application-type liquid fertilizer such as large energy loss, low efficiency, transporting liquid fertilizer hose winding, etc, because of intricate piping in splitter and fertilization institutions of deep application-type liquid fertilizer. Hence, we designed a rotor type liquid fertilizer converter by theoretical analysis and Adams simulation method in order to solve the above problems. Using the converter, which could replace original splitter and any original tubing of fertilization institutions, we designed the pipe system of transporting liquid fertilizer. We used the new pipeline system with the converter in an anti-winding test. We also used the new one and the original pipeline for a comparative fertilization experiment. When finished the anti-winding experiment we found that when the sun gear and the planetary gear ratio was 3:1 and the sun gear and the planet carrier speed ratio was 2:3, the converter applications could better solve the transporting liquid fertilizer hose winding problem of fertilization institutions. When finished the comparative fertilization experiment we found that the new pipeline system efficiency was 2.63 times of the original pipeline system when fertilizer was 20.32 mL/time and pump pressure was 0.31 MPa.

**Key words:** Converter Liquid fertilizer Pipeline system