

基于流量调节阀和神经网络的植保机械在线混药装置*

李晋阳 贾卫东 魏新华

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 农药的小流量、高精度实时动态测控是在线混药装置急需解决的一个关键问题。流过调节阀的流量与阀前后压差、流体密度、阀开度有关,通过建立流量与这3个变量间的关系表达式,即可利用调节阀对药液流量进行实时检测和控制。设计了利用流量计和调节阀分别对水和农药原液进行计量的在线混药装置,在提出调节阀相应标定方法的基础上,建立了调节阀的流量关系表达式,并在室内进行了测试。结果表明,农药流量在24~240 mL/min范围内时,混药装置的药液流量相对偏差均小于4%。

关键词: 喷雾 混药装置 流量调节阀 神经网络 在线混药

中图分类号: S237; S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0098-06

引言

植保机械在线混药避免了人工混药和清洗,便于实现植保机械施药量与机组行驶速度的自动匹配,提高了施药过程的安全性^[1]。目前国内变量喷雾主要采用预混药式,药液浓度不变,通过改变施药量得以实现^[2-4],主要手段有压力式^[2-3]、脉宽调制(PWM)式^[4-6]等。以上方式通常使喷雾效果(雾滴大小、飘移性和分布均匀性)受到一定的影响。实时混药变量喷雾也已有研究成果,但农药原液的小流量计量和控制问题仍没有得到完全解决。

Miller等利用微孔流量计对一种混药装置的质量浓度变化进行了监测^[7],但该方法用到的流量计成本较高。刘志壮等采用研制的差压式液体流量计对进入混药器的水流量和农药流量同时进行测控,从而实现在线混药^[8],但差压式流量计存在测量精度普遍较低、压损大、测量范围窄的缺点。贾卫东等针对采用开环控制方式的喷雾施药在线混合装置存在无法实时获取混合比信息和抑制混合管路扰动信号所引起的混药比偏差两个主要问题,基于农药光透性的混药比反馈进行了在线混药装置的研究,实现了在线混药的闭环控制^[9],该方法只能对有色农药进行检测,且没有指出采用何种控制方法。邱白晶等根据不同质量浓度溶液折光率不同的原理,进行了混药质量浓度的在线检测^[10],但该方法也只能对有色农药进行检测。李羊林等对双级射流装置进

行了试验研究,揭示了试验中各参数之间对压力损失、混药比之间的内在规律^[11]。近年来,国外学者对喷头注入式在线混药方式进行了研究,试图通过缩短混药管路以减小扰动因素对混药过程的干扰,并缩短在线混药响应时间,但存在药液混合均匀性难以保证和要求药液注入装置出口压力较高的问题,从而使得混药装置成本较高^[12-15]。目前仍缺乏简单、低成本、确实有效的在线混药装置,需要突破的关键问题是农药的小流量实时动态测控。

为此,本文提出一种利用调节阀对药液流量实时检测和自动控制、药水混合液浓度可调、在线自动混药的变量喷雾系统,并进行室内试验。通过对水流量和农药流量同时进行测控,实现在在线混药的同时获得药液的质量浓度和体积浓度。

1 混药装置结构与工作原理

1.1 混药装置结构

在线混药装置的结构如图1所示。事先将水和农药分别储存在水箱和药箱中。在隔膜泵和药泵作用下,水和农药在管道混合,经过滤器过滤后通过相应电磁阀和喷头喷出。农药流量由流量调节阀实现精密测量和控制,水流量通过流量传感器检测。通过精密控制水流量和农药流量即可获得所需的药液浓度。为防止混合后的药液向药箱倒流,在流量调节阀的出口管路上设置了单向阀。溢流阀3和溢流阀13分别用于限制在线混药装置的喷杆压力和药

收稿日期:2014-06-13 修回日期:2014-07-30

*国家自然科学基金资助项目(51275215)、江苏省农业装备智能化高技术重点实验室资助项目(BM2009200)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2011048)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2013401)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介:李晋阳,讲师,主要从事检测技术与智能控制研究,E-mail:by0817136@163.com

液管路的工作压力。差压传感器用于对流量调节阀的进出口压差进行检测。各高速开关电磁阀由控制器输出的多路独立可调的信号分别控制。当电磁阀开启时,药液经电磁阀由喷头喷出;电磁阀关闭,停止喷雾。同时设置 4 个喷施流量传感器,以实现各喷杆分区内实际喷施流量的实时监测。药液注入泵采用 RS-360SH 型齿轮泵,流量为 $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 。水泵采用 PLD-1201 型隔膜泵,操作电压为直流 12 V。

所研究的喷杆喷雾机喷雾量为 $12 \sim 120 \text{ L}/\text{min}$, 药水混合比一般为 $1:500$, 则农药的流量为 $24 \sim 240 \text{ mL}/\text{min}$, 目前市场上难以找到这种小规格、高分辨率的流量计,这就要求必须通过其他手段解决农药的小流量检测,本文提出用流量调节阀来实现对农药流量的检测和控制方法。

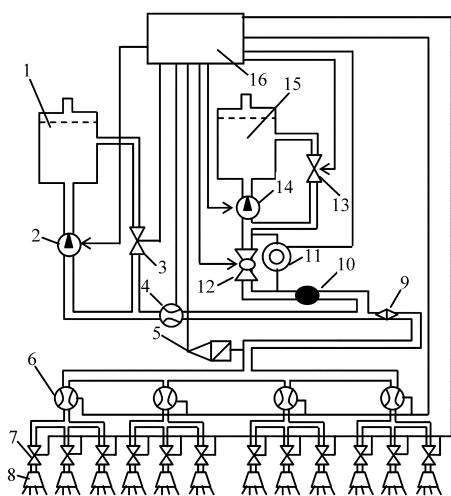


图 1 喷雾机混药装置结构示意图

Fig. 1 Structure of mixing pesticide equipment

1. 水箱 2. 隔膜泵 3. 比例溢流阀 4. 水流量传感器 5. 喷雾压力传感器 6. 喷施流量传感器 7. 高速开关电磁阀 8. 喷头
9. 过滤器 10. 单向阀 11. 差压传感器 12. 流量调节阀 13. 药液比例溢流阀 14. 药泵 15. 药箱 16. 控制器

1.2 工作原理

流过调节阀的流量表达式为^[15]

$$Q = K_v N \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} = K_v N \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

其中 $\Delta p = p_1 - p_2$

式中 ρ ——流体密度 K_v ——调节阀流量系数

p_1, p_2 ——阀前、阀后压力

N ——工程单位系数

由调节阀的节流特性分析可知^[16-17], 流过调节阀的流量主要取决于阀门与流体的物理特性, 且调节阀流量系数 K_v 随阀门开度变化而变化, 因而在流体物理特性不变时, 流量关系表达式表示为

$$Q = f(\Delta p, O) \quad (2)$$

式中 O ——阀门开度

考虑到喷雾作业时药水体积比约为 $1:500$, 农药占药水混合液的份额较小, 因此, 可将药水混合液的密度近似为水的密度, 即在混药过程中药水混合液密度为一常数。结合式(2)可知, 流过调节阀的农药流量只与流量调节阀上下游压差和阀开度有关。因此, 只要通过标定建立流量与流量调节阀上下游压差及阀开度间的关系模型, 即可通过控制阀门开度来在线检测和控制药液的实际流量, 从而实现在线实时混药。另外, 喷雾压力一般在 $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 之间, 在喷雾作业过程中, 喷到大气中的雾滴为 1 个大气压(约 0.1 MPa), 即使忽略管路压力损失, 调节阀上下游最大压差为 0.4 MPa , 因此, 下面主要对压差小于 0.4 MPa 情况展开研究。

2 控制系统设计

为实现在线自动混药的变量喷雾(改变药液浓度), 设计了混药装置控制器, 结构原理如图 2 所示。

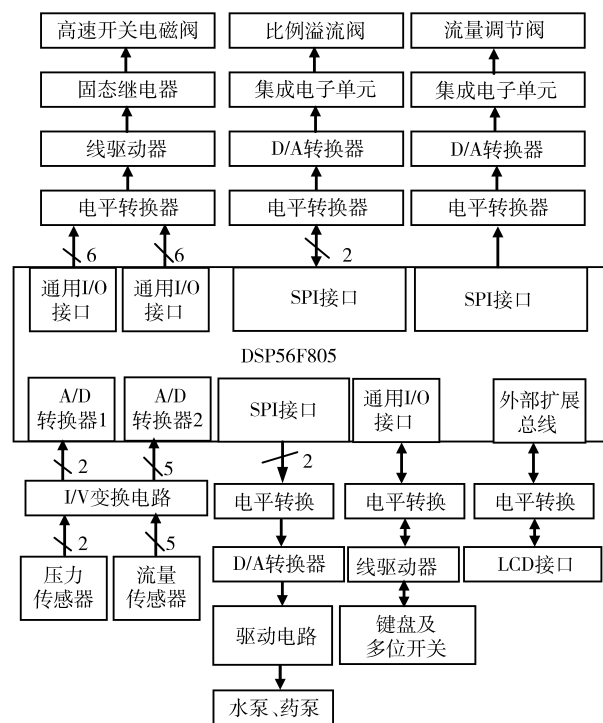


图 2 混药装置控制器原理框图

Fig. 2 Schematic of mixing pesticide controller

控制器通过 CAN 总线接收上位机传输的药水混合比、喷雾位置等命令, 控制器可根据作物的病虫害情况实时控制药液浓度和喷头的喷雾状况。

控制器选用 DSP56F805 型数字信号控制器(飞思卡尔半导体公司, 美国)。DSP56F805 为 3.3 V 系统, 因此系统中多处设置电平转换器, 以完成 5 V 信号和 3.3 V 信号间的相互转换。L/V 变换电路中, 采用 165Ω 的精密电阻将 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 的电流信号转变为 $0.66 \sim 3.3 \text{ V}$ 的电压信号。D/A 转换器采用

TLC5615, 10 位分辨率, SPI 串行接口、电压输出。

2.1 比例溢流阀

比例溢流阀选用 DBEE 6-1X/50 型先导式比例溢流阀(博世力士乐股份公司, 德国), 最大流量为 30 L/min, 通径 6 mm, 最大工作压力 5 MPa, 操作电压为直流 24 V, 内部自带控制用集成电子元件, 控制信号为 0~10 V 电压信号, 10% 至 90% 阶跃响应时间约 80 ms, 90% 至 10% 阶跃响应时间约 50 ms。

2.2 传感器

喷杆压力检测采用 CYT 101 型压力变送器(北京天宇恒创有限公司), 最大静压小于等于 20 MPa, 工作电压直流 24 V, 量程 0~5 MPa, 检测精度 $\pm 0.2\%$ F. S., 4~20 mA 电流输出, 响应时间小于等于 1 ms。

水流量检测和喷施流量检测分别采用 LWGY-15 和 LWGY-6 型液体涡轮流量传感器(北京天宇恒创有限公司), 量程分别为 0.1~0.6 m³/h 和 0.3~3 m³/h, 检测精度为 $\pm 2\%$ F. S., 4~20 mA 电流输出, 工作电压为直流 24 V, 耐压 6.3 MPa。

差压传感器选用 HM31-3-A1-F0-W1 型差压变送器(德国 HELM 公司), 量程 0~500 kPa, 检测精度 $\pm 0.1\%$ F. S., 4~20 mA 电流输出, 响应时间小于 2 ms。

2.3 流量调节阀控制装置

针阀(10VRMM2812-C4 型, 美国 Parker Autoclave Engineers)、直流电动机(工作电压直流 24 V)和减速器组成了流量调节阀控制装置, 阀芯通过联轴器与减速器连接, 电动机转动控制阀的开度, 从而控制流量大小。

3 标定装置与方法

农药流量与阀开度的对应关系需要通过标定来确立。使用纯净水代替真实农药。标定装置如图 3 所示。在控制器作用下, 使流量调节阀上游压力稳定在 0.5 MPa, 控制器通过差压传感器检测流量调节阀上下游压力, 压力调节阀用于改变调节阀出口压力。需要说明的是, 压力调节阀、量筒和电子天平只在标定过程中使用。

具体标定方法为:

(1) 手动调节压力控制阀以改变流量调节阀下游压力, 直到压力稳定在约为 0.1 MPa(1 个大气压)。

(2) 通过控制器控制流量调节阀开度从 100% 以 5% 的步长逐渐减小到 10%, 启动混药装置, 待喷雾压力稳定后, 在每种开度下连续喷雾 60 s, 同时

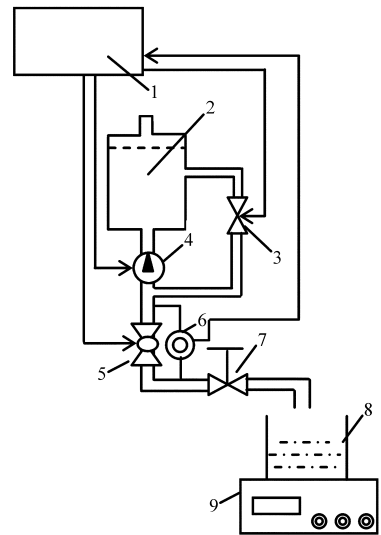


图 3 标定装置结构示意图

Fig. 3 Structure of calibration device

1. 控制器 2. 药箱 3. 比例溢流阀 4. 药泵 5. 流量调节阀
6. 差压传感器 7. 压力控制阀 8. 量筒 9. 电子天平

分别用 2 000 mL 的量筒和精度为 ± 0.1 g 的电子天平记录水的体积和质量, 通过计算即可获得各对应开度下药液的体积流量和质量流量。

(3) 手动调节压力控制阀, 使流量调节阀下游压力分别设定为 0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.495 MPa, 重复步骤(2), 获得不同压差时, 调节阀开度与流量的对应关系。

通过上述过程, 可获得 8 种压差条件和 19 种开度条件下的 152 个有效样本数据(具体数据见表 1,

表 1 神经网络建模样本数据

Tab. 1 Data samples for neural network modeling

阀开度/%	流量 $Q/(mL \cdot min^{-1})$	
	阀上下游压差为 5 kPa	阀上下游压差为 350 kPa
10	6.16	36.47
15	7.40	43.80
20	8.89	52.61
25	10.68	63.18
30	12.83	75.88
35	15.40	91.14
40	18.50	109.46
45	22.22	131.46
50	26.69	157.89
55	32.05	189.63
60	38.50	227.75
65	46.24	273.53
70	55.53	328.52
75	66.69	394.56
80	80.10	473.88
85	96.20	569.15
90	115.54	683.56
95	138.77	820.97
100	166.67	986.01

限于篇幅限制,在此只给出采集的部分原始样本数据)用于 BP 神经网络建模和结果校验。在模型适用范围内,随机选取了未参与建模的 10 个样本用于结果校验。

4 BP 神经网络建模

通过对采集的原始样本数据的分析发现,流量 Q 与调节阀上下游压差、阀门开度呈明显非线性关系,这与 1.2 节的理论分析相一致。而神经网络具有很强的非线性映射能力,因此本文采用神经网络建模方法。3 层神经网络的数学表达式为^[18]

$$z_k = f_z \left(\sum_{j=1}^J y_j w_{ojk} + c_k \right) \quad (3)$$

$$y_j = f_y \left(\sum_{i=1}^I x_i w_{hij} + b_j \right) \quad (4)$$

式中 x_i ——输入量,本文中代表调节阀上、下游压力差 Δp 、阀门开度 O

y_j ——隐层输出

I, J ——输入层和隐层节点个数

z_k ——输出,代表液体流量

w_{hij} ——输入层到隐层的权值

b_j ——隐层神经元的阈值

w_{ojk} ——隐层到输出层权值

c_k ——输出层阈值 f_y, f_z ——激励函数

隐层选用传递函数 $f(x) = \tan(1/(1 + e^{-x}))$, 输出层选用线性函数。网络训练选用 Levenberg - Marquardt (LM) 算法,经过对比多次训练结果,本文最后选用 2-5-1 的网络结构,所得到的训练结果如表 2 所示。式(3)、(4)及表 2 所示的权值构成了所建立的非线性模型。

表 2 神经网络的权值和阈值

Tab.2 Values of weights and thresholds

j	w_{h1j}	w_{h2j}	w_{oj1}	b_j	c_k
1	-1.617 2	0.853 7	-3.838 1	-5.852 7	3.809 1
2	-1.953 2	-1.048 4	2.941 3	0.155 1	
3	0.220 6	0.875 6	-2.195 1	10.813 8	
4	-3.342 3	3.573 6	-0.673 3	0.003 9	
5	-4.845 2	-0.044 4	-0.852 6	-0.003 4	

注: w_{hij} (i 取 1, 2, 分别对应阀上下游压力差和阀门开度)为第 i 个输入所对应的第 j 个隐层节点权值, w_{oj1} 为输出层所对应的第 j 个节点权值。

5 混药装置性能测试

为检验所建模型在 2 个输入变量:调节阀上下游压差 Δp 为 5 ~ 400 kPa、阀门开度 O 为 10% ~ 100% 范围内的适用性,将所建模型写入混药装置的控制中,同时通过控制 Δp 和 O ,使 Δp 和 O 呈现

10 个不同组合(未参与建模),具体组合见表 3。所采用的试验装置如图 4 所示。在控制器作用下,对这 10 个组合下对一定时间内农药流量用量筒和精度为 ± 0.1 g 的电子天平对混药装置工作过程中的农药流量进行计量,获得质量流量和体积流量(表 3 中的实测值)。将每个样本对应的 2 个输入变量的值代入所建模型,即可得到相应的计算值,最后将实测流量值与计算值进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 试验结果

Tab.3 Experiment results

序号	阀上下游压差/kPa	阀开度/%	流量计算值/(mL·min ⁻¹)	流量实测值/(mL·min ⁻¹)	相对偏差/%
1	7	12	5.55	6.1	-9.02
2	35	72	111.79	107.8	3.70
3	60	57	84.48	84.4	0.09
4	120	43	71.54	69.6	2.79
5	180	52	121.84	119.5	1.96
6	230	22	45.89	46.5	-1.31
7	255	63	216.98	216.1	0.41
8	295	16	41.71	43.4	-3.89
9	310	86	555.62	559.6	-0.71
10	325	93	735.22	738.1	-0.39



图 4 试验装置

Fig.4 Experiment device

考虑到喷雾作业时喷雾机组农药流量为 24 ~ 240 mL/min,因此,所设计的混药装置提供的农药流量调节范围为 24 ~ 240 mL/min 即可满足要求。由表 1 和表 3 可知,所设计的混药装置完全满足要求。

表 3 所示的 2 ~ 10 号 9 个随机检验样本模型计算值和实测值间的相对偏差均小于 4%,而 1 号样本的相对偏差较大,达到 9.02%,这表明在低流量时混药装置的控制精度较低,同时由于实际喷雾作业时农药流量为 24 ~ 240 mL/min,而 1 号样本对应的流量小于 24 mL/min,因此,虽然 1 号样本的相对偏差较大,但不会影响实际作业过程中农药流量的控制精度。另外,虽然通过继续增加训练样本数量、增加神经网络隐层节点数等有可能进一步提高模型

拟合精度。但也会由此带来神经网络学习过度,呈现对训练样本拟合精度高而对未参与训练的测试样本拟合精度低的情况。

6 结论

(1) 基于在线混药装置的需要,以 DSP56F805 芯片为核心,设计了药水流量实时检测、流量自动控制、在线自动混药的变量(变药液浓度)喷雾系统,实现了变量喷施作业过程中的低成本、高精度自动实时在线混药。

(2) 在线混药装置,采用调节阀对农药原液进行测控,采用普通流量计对水进行检测,通过作业时的喷雾机组喷幅宽度、喷头在当前喷施区域的农药原液设定施用量在线自动调节农药原液流量,使整个作业过程中药液浓度稳定。

(3) 所研制的混药装置,不仅可获得药水混合液的体积浓度,还可获得质量浓度。农药流量在 24 ~ 240 mL/min 范围内时,混药装置的药液流量相对偏差均小于 4%。

参 考 文 献

- 邱白晶,徐溪超,邓斌,等.射流混药装置面积比对混药均匀性的影响[J].农业机械学报,2011,42(10):95-100.
Qiu Baijing, Xu Xichao, Deng Bin, et al. Effect of area ratio on mixing homogeneity in jet-mixing apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):95-100. (in Chinese)
- 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 spay [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):118-121. (in Chinese)
- 刘曙光.压力式可变量喷雾技术的研究[J].农机化研究,2006(7):146-147.
Liu Shuguang. Study of pressure-based variable rate spray technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(7):146-147. (in Chinese)
- 焦俊生,张伟.脉宽调制型变量喷雾控制 ECU 设计与分析[J].农业机械学报,2007,38(1):123-126.
Jiao Junsheng, Zhang Wei. Design and analysis of the ECU for PWM spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):123-126. (in Chinese)
- 魏新华,蒋杉,张进敏,等.脉宽调制间隙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, 2013, 44(2):87-92. (in Chinese)
- 魏新华,蒋杉,孙宏伟,等. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试[J].农业机械学报,2012,43(12):87-93,129.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Sun Hongwei, et al. Design and test of variable rate application controller of intermittent spray based on PWM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):87-93,129. (in Chinese)
- Miller M S, Smith D B. A direct nozzle injection controlled rates pray boom [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(3):781-785.
- 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)
- 贾卫东,陈志刚,赵鑫,等.基于农药光透性的混药比反馈在线混药装置[J].农业机械学报,2013,44(8):90-93.
Jia Weidong, Chen Zhigang, Zhao Xin, et al. Online pesticide mixer with mixing ratio feedback based on light permeability of pesticides [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):90-93. (in Chinese)
- 邱白晶,贾方闻,邓斌,等.混药质量浓度在线检测装置[J].农业机械学报,2014,45(2):99-104.
Qiu Baijing, Jia Fangwen, Deng Bin, et al. Online detector of pesticide mixing concentration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):99-104. (in Chinese)
- 李羊林,吴春笃,傅锡敏.双级射流混药装置的试验研究[J].农业工程学报,2008,24(1):172-174.
Li Yanglin, Wu Chundu, Fu Ximin. Experimental study on two-stage jet mixing apparatus [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):172-174. (in Chinese)
- Vondricka J, Lammers P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming [J]. Precision Agric., 2009, 10(5):421-430.
- Vondricka J, Lammers P S. Measurement of mixture homogeneity in direct systems [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1):61-66.
- Doerpmund M, Cai X, Walgenbach M, et al. Assessing the cleanability of a direct nozzle injection system [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(7):49-56.
- 何衍庆,邱宣振,杨洁,等.控制阀工程设计与应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- Atmanand A M, Aonnur M S. A novel method of using a control valve for measurement and control of flow [J]. IEEE Transactions on Instrument and Measurement, 1999, 48(6):1224-1226.
- Thananchai Leephakpreeda. Flow-sensorless control valve: neural computing approach [J]. Flow Measurement and

Instrumentation, 2003, 14(6):261-266.

- 18 李晋阳, 孟晓风, 董登峰. 低压宽温状态下气体流量的动态测量方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):217-222.
Li Jinyang, Meng Xiaofeng, Dong Dengfeng. Dynamic measurement method of gas flow rate at low pressure and wide temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 217-222. (in Chinese)
- 19 周良富, 傅锡敏, 薛新宇, 等. 基于 CFD 的射流式在线混药装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1):107-112.
Zhou Liangfu, Fu Ximin, Xue Xinyu, et al. Design and experiment of jet mixing apparatus based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1):107-112. (in Chinese)

On-line Mixing Pesticide Device Based on Flow Control Valve and Neural Network

Li Jinyang Jia Weidong Wei Xinhua

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Techenology, Ministry of Education,
Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Small flow high precision real-time dynamic detection and control of pesticide is a key problem which need to solve urgently for on-line mixing device. Flow rate passing the flow regulating valve is related to differential pressure between the upstream and downstream of the valve, fluid density and the valve opening. By developing the relation expression between flow rate and these three variables, real-time detection and control for pesticide flow rate can be implemented using the control valve. In order to meter and control the flow rate of water and pesticide by using flow meter and control valve respectively, the online mixing pesticide device is designed. The calibration method of control valve is proposed and the flow rate relation expressions are developed. The experiments are conducted for the designed mixing device. The experimental results show that the relative error of the pesticide flow rate is less than 4% as the pesticide flow rate is between 24 mL/min and 240 mL/min.

Key words: Spray Mixing pesticide device Flow control valve Neural network Online mixing pesticide