

基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验

李加念^{1,2}, 洪添胜^{2,3,4*}, 冯瑞珏^{2,5}, 倪慧娜²

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 3. 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642; 4. 国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广州 510642; 5. 华南理工大学广州学院, 广州 510800)

摘要: 为提高混肥精度, 该文在基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置的基础上, 对其结构进行了改进, 并利用电导电极设计了一个电导率测量仪用以实时反馈肥液浓度, 使之构成一个闭环控制的自动混肥装置。该装置采用粗细 2 级调节的控制策略, 首先根据检测的入口水压调用对应的函数关系, 自动调节电磁阀 PWM (pulse width modulation) 控制的占空比进行混肥; 然后以电导率测量仪实时反馈混肥浓度, 并采用模糊控制算法进一步细调 PWM 的占空比, 使混肥浓度尽量逼近目标浓度。试验结果表明, 电导率测量仪的有效测量范围为 0~12.64 mS/cm, 它所测量的电导率与肥液浓度呈显著的线性关系, 其决定系数 R^2 为 0.997。对混肥装置进行了实试验证, 结果表明混肥时的最大浓度误差为 0.04%, 控制装置达到稳态的响应时间为 7.8~10.4 s, 能满足实际应用的要求。

关键词: 肥料, 模糊控制, 自动, 混合, 液体, 肥液浓度, 电导率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.004

中图分类号: S224.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0022-09

李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 22-30.

Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 22-30. (in Chinese with English abstract)

0 引言

灌溉施肥是一种水肥一体化灌溉技术, 它是指将肥料溶于灌溉水中, 并借助于压力灌溉系统在灌溉水的同时将肥料同步输送到作物根部土壤, 具有施肥均匀、水和肥利用率高以及能有效减轻土壤和环境的污染等特点, 已被广泛地应用于微灌系统中。

施肥装置是实现灌溉施肥的主要手段和重要设备之一。目前国内外常用的施肥装置主要有自压式^[1]、压差式^[2]、水力驱动注入式^[3-6]、机械驱动注入式^[7-9]和文丘里吸入式^[10-11]等几种形式, 各种形式的施肥装置都有其各自的优缺点, 而且从自动控制角度分析, 其混肥浓度的控制性能也各

有差异^[12-13]。其中, 文丘里吸入式结构简单且经济实用, 得到了广泛的应用, 但其混肥浓度不易于实现自动调控, 为此, 根据文丘里施肥器的进出口压力比与施肥浓度有着某种固定的关系^[14], 以及在其出口处调节进出口压力差可以有效地改变其施肥浓度^[15], 在文丘里施肥器的基础上, 利用脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 技术设计了一种水肥一体化变量施肥装置, 通过自动调节电磁阀 PWM 控制的占空比来实时改变吸肥浓度, 并得出了不同进口水压下 PWM 占空比与吸肥浓度的关系^[16]。但从自动控制角度看, 该装置属于开环控制, 其混肥精度与稳定性难以得到保证, 需采用相应的控制方法以提高其精度与稳定性。

模糊控制因不依赖于精确的数学模型, 适用于非线性、时变性及纯滞后对象的控制, 在自动混施肥系统中得到了广泛的应用。邵利敏等^[8]利用模糊控制算法确定各归一化植被差异指数区间的最佳施肥量, 并结合施肥机具行进速度调节施肥量, 实现实时变量施肥。孙裔鑫等^[17]、梁春英等^[18]分别在播种施肥机上利用模糊 PID (proportion integration differentiation) 控制算法实现了对颗粒状肥料、液体肥的精确施用。古玉雪等^[19]为协调双变量施肥机车载电脑有限的运算能力与施肥精度和均匀性之

收稿日期: 2012-12-04 修订日期: 2013-07-02

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-27); 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903023); 昆明理工大学省级人培项目 (KKS201323003)

作者简介: 李加念 (1983-), 男, 湖南道县人, 博士, 讲师, 主要从事电子信息技术及测控技术应用研究。昆明 昆明理工大学现代农业工程学院, 650500。Email: ljn825@163.com

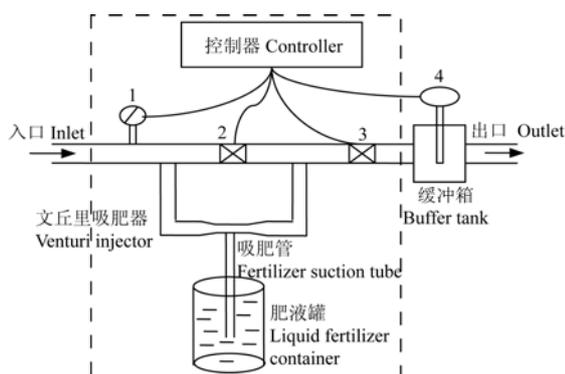
*通信作者: 洪添胜 (1955-), 男, 广东梅县人, 博士, 教授, 博士生导师, 农业工程学会高级会员 (E041200036S), 主要从事农业工程、机电一体化和信息技术应用研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: tshong@scau.edu.cn

间的矛盾,提出了一种基于模糊系统的开度转速双变量施肥播种控制序列生成方法,试验表明使用该方法的施肥机指令响应及时,播撒均匀,平均施肥误差比常用方法减小了 4%。Domingo 等^[20]将模糊控制技术与 FPGA (field programmable gate array) 技术相结合,研制了一个可在线混合营养液浓度的温室灌溉施肥系统,具有良好的节水节肥效果。么丽丽^[21]、杨青云^[22]、周亮亮^[23]、张琼^[24]、雷永富^[25]等根据传感器采集的溶液电导率信息或酸碱度信息,采用模糊控制策略控制混肥泵、电磁阀等进行肥液或营养液的在线自动混合,实现了水肥一体化的自动控制,经仿真、试验表明所设计的灌溉施肥系统的性能指标满足实际要求。

由上述可知,将模糊控制应用于自动混肥装置中能取得良好的效果。因此,本文拟在基于脉宽调制的变量施肥装置的基础上,通过改进装置结构,并增加一个肥液浓度的反馈模块,使整个装置构成一个闭环系统,并采用模糊控制策略,以期提高装置的自动混肥精度和稳定性。

1 装置结构及原理

本装置的结构如图 1 所示,它是在文献[16]所设计的装置(图 1 中虚线框内的部分)的基础上,通过在主管的出口方向上安装一个缓冲箱和增加一个肥液浓度测量模块 4 来实现的。缓冲箱用于将水、肥充分混合均匀,并使混合液短暂地驻留其内,以便于肥液浓度的精度检测;肥液浓度测量模块 4 通过将其传感部件置于缓冲箱内,用于实时测量混合后的肥液浓度,并将测量结果反馈至控制器。



1. 压力变送器 2. 电磁阀 1 3. 电磁阀 2 4. 肥液浓度测量模块
1. Pressure transmitter 2. Solenoid valve 1 3. Solenoid valve 2
4. Liquid fertilizer concentration measuring module

图 1 肥液自动混肥装置的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer

主管的直径为 32 mm;文丘里施肥器(塑料材质,规格为 25 mm,工作压力 ≤ 0.6 MPa,

流量为 $0.5\sim 2\text{ m}^3/\text{h}$,施肥浓度为 $0\sim 10\%$)与主管并联安装,吸肥管为直径 12 mm 的硬质胶管;缓冲箱呈圆柱体形状,其圆截面直径为 63 mm,高为 40 cm,安装在距文丘里施肥器出口 30 cm 处,且圆柱体的轴向中心线与主管的轴向中心线重合;电磁阀 1 和电磁阀 2 为双稳态脉冲电磁阀,其工作电压为直流 $3\sim 12\text{ V}$;压力变送器的型号为 AOB-131,其量程为 $0\sim 1\text{ MPa}$,精度 0.4 级;控制器采用 MSP430F2132 单片机作为主控制器。

本装置主要是通过调节电磁阀 2 的 PWM 控制的占空比来实现混肥浓度的自动调节。当启用装置进行工作时,首先关闭电磁阀 2,同时利用压力变送器 1 检测入口水压,根据检测结果调用各个压力下所标定的 PWM 占空比与目标施肥浓度的对应关系,对 PWM 占空比进行调节,使混肥浓度趋近于目标浓度;然后利用肥液浓度测量模块 4 实时反馈混合浓度,并根据反馈结果细微调整 PWM 占空比,使肥液混合后的浓度尽量逼近于目标浓度,从而减小混肥误差。

2 肥液浓度测量模块

2.1 测量原理及方法

由于肥料的原料大多数为无机盐类,而这些无机盐类属于强电解质,在水中可以被电离成带正、负电荷的离子,因此,肥液是一种电解质溶液,具有导电能力。肥液的导电能力一般用电导率来表征,电导率越大则溶液的导电能力越强,而肥液的电导率与肥液浓度有着显著相关性^[26],因此可通过测量肥液电导率的方法来间接测量肥液浓度。

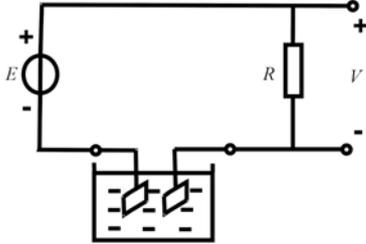
肥液像任何一种导电介质一样,当电流通过时会存在一个等效电阻,对电流形成一定的阻力。一般用电导和电导率来表示这个阻力的大小,即

$$G = \frac{1}{R_x} = \frac{1}{\rho \cdot l} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A}{l} = \sigma \frac{A}{l} = \frac{1}{k} \sigma \quad (1)$$

式中, G 为电导, S; R_x 为肥液等效电阻, Ω ; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; l 为电导电极两极片之间的距离, cm; A 为肥液的导通截面积, cm^2 ,与极片面积有关; k 为电极常数, cm^{-1} ,其值为 l 与 A 之比; σ 为电导率, S/cm。

由此可见,肥液的电导率越大则其电导也越大,即其等效电阻越小。因此,可以通过测量肥液的电导或等效电阻的方式来测量其电导率,并根据肥液电导率与其浓度的函数关系(通过试验标定得到),进而测量出肥液的浓度。

目前,测量电解质溶液电导率的方法主要有电极法、电容耦合法和电磁感应法等。本文综合考虑实际应用,采取电极法进行肥液电导率的测量。具体的测量方法如图 2 所示,将一个电导电极置于待测肥液中,并电导电极上串联一个电阻 R ,然后在电导电极与电阻 R 的两端加一个激励电源 E 进行测量。



注: E 为激励电源; R 为电阻; V 为电阻 R 两端的电压。
Note: E is excitation power supply; R is resistor; V is voltage at resistor R .

图 2 电极法测量电导率的示意图

Fig.2 Diagrammatic drawing of conductivity measuring with electrode method

当肥液浓度发生改变时,其电导率也会随之变化,从而电导电极两极片间的肥液等效电阻 R_x 也会不同,而电阻 (R, Ω) 与电导电极极片间的肥液等效电阻 R_x 形成分压电路,通过测量电阻 R 上的电压 (V, V) 就可获知肥液的等效电阻,根据等效电阻即可换算出电导率。由图 2 可计算出肥液等效电阻 R_x 为

$$R_x = \frac{E \times R}{V} - R \quad (2)$$

式中, E 为激励电源的电压, V 。

根据肥液的等效电阻 R_x 和电导电极的电极常数 k 可计算出肥液的电导率 $\sigma^{[27]}$, 即

$$\sigma = k \times \frac{1}{R_x} \quad (3)$$

2.2 电导率测量仪的设计

2.2.1 电导电极及其激励源的选择

由于在农业应用中,肥液浓度对应的电导率通常在 $0.5 \sim 4.0 \text{ mS/cm}$ 范围内,因此选用量程为 $10 \sim 20\,000 \mu\text{S/cm}$ 的工业电导电极(上海华乐电子有限公司生产,钛合金材质)进行电导率的测量。该电极的测量精度为 0.01 mS/cm , 电极常数 $k=10 \text{ cm}^{-1}$, 其输出为待测溶液的等效电阻。

当电导电极置于肥液中测量时,整个电导池表现为一个复杂的电化学系统,电导电极等效于电阻和电容串并联构成的网络,在测量过程中会存在极化效应(包括化学极化和浓差极化)和电容效应,从而引起测量误差。由于电极采用直流

电压供电时的极化效应很严重,通常都采用交流电压作为电极的激励源进行测量,但电极激励源的类型、频率和幅值的选取是否合适,直接影响着其测量精度和稳定性。为确定电极的激励源,以电导率为 $1\,413 \mu\text{S/cm}$ 的标准溶液(哈希公司生产)作为基准溶液,通过兑水的方式配制了一系列不同电导率的待测溶液,并在电极上串联一个 $2\,200 \Omega$ 的分压电阻(型号为 RJ71),同时以函数发生器(型号为 SPF05)输出不同频率、幅值的方波或正弦波信号作为电极的激励源,分别在各个待测溶液中进行测试试验。试验过程中,以 1 V 为步进、在 $0 \sim 10 \text{ V}$ 范围内调节函数发生器输出波形的峰-峰值,并分别在每个峰-峰值下,缓慢地调节输出波形的频率在 $0 \sim 10 \text{ kHz}$ 范围内变化,同时用示波器(型号为 Tektronix TDS2041)进行观察。若发现,分压电阻上的波形信号的形状、频率均与激励源一致,且该波形信号的峰-峰值或有效值在各个待测溶液中均能长时间保持稳定,则表明电极在该激励源作用下,其测量时的极化效应和电容效应基本上被消除。并以此作为选取激励源的依据。

根据对各组试验结果的对比分析知,采用幅值为 $\pm 3.5 \text{ V}$ 的方波信号作为电极的激励源,其测量效果最佳,而且此时分压电阻上的波形电压的有效值保持稳定。

2.2.2 电导率测量范围分档

试验中发现,当电导电极串联一个固定的分压电阻、以相同频率的方波激励信号在其电导率量程范围内进行测量时,其误差会随着待测溶液电导率的增大或减小而变大。因此,需在全量程内对电导率进行分档测量,即将电导率的全量程分成多个测量范围,对于每个测量范围选取一个合适的分压电阻与电极串联,并采用一个合适频率的激励源进行测量,以提高测量精度。

为能合理地进行分档,在电极量程范围内从低到高配制一系列不同电导率的待测溶液,待测溶液的电导率由便携式多参数测量仪(型号为 sension156, 哈希公司生产)测量而得,对于每一种待测溶液,通过改变与电极串联的分压电阻及激励源频率进行测量,以分压电阻上测得的有效值等于或接近于激励源的 $1/2$ 作为分档标准。由试验得出的电导率分档范围及其对应的分压电阻和激励源频率如表 1 所示。不同档位所需的与电极相串联的分压电阻,通过单片机控制一个多路复用器 ADG1408 进行自动切换。

表 1 电导率分档范围及其对应的分压电阻和激励源频率

Table 1 Grading range of conductivity and it's corresponding divider resistance and stimulus source frequency

电导率 Electric conductivity ($\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$)	电阻 Resistance/ Ω	频率 Frequency/Hz	电导率 Electric conductivity/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	电阻 Resistance/ Ω	频率 Frequency/Hz
0~1.0	15000	150	>5.5~7.5	2200	2600
>1.0~2.0	10000	350	>7.5~9.5	1000	3500
>2.0~4.0	4700	500	>9.5~10.0	1000	4000
>4.0~4.5	2200	800	>10.0~15.0	1000	6000
>4.5~5.5	2200	1800	>15.0~19.5	330	9000

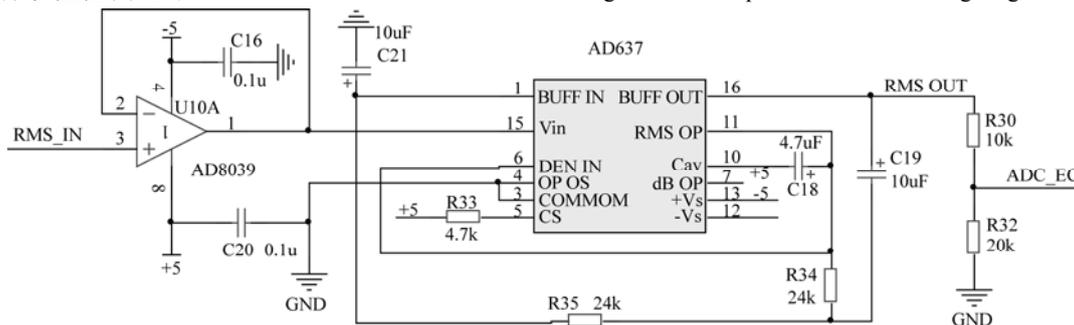
2.2.3 信号调理电路

电导电极测量电导率的信号调理电路主要由方波激励信号产生电路和分压电阻上的波形信号的有效值检测电路 2 部分组成。

1) 方波激励信号产生电路

如图 3 所示，方波激励信号产生电路主要由 MOS 管 Q4、运算放大器 AD8039 及一些外围的阻容元件组成。其中，某一频率的方波信号由 MSP430F2132 单片机内部集成的 PWM 控制器生成，该 PWM 控制器以单片机外接的 8 MHz 晶振为时钟源，其输出的方波频率经与示波器 (Tektronix TDS2041) 比较，误差小于 1%；MOS 管 Q4 与电阻 R29 组成一个电平转换电路，用于将方波信号转换成高电平为 3.5 V、低电平为 0 的方波信号；AD8039 中的其中一个放大器 U7B 连接成电压跟随器形式，以提高方波信号的带负载能力；而 AD8039 的另一个放大器 U7A 与电阻 R25、R27、R28 和 R31 构成一个偏置电压为 3.5 V、增益为 2 倍的运算电路，即它将电压跟随器输出的方波信号放大 2 倍后再与 3.5 V 相减，从而可以使整个电路输出 $\pm 3.5 \text{ V}$ 的方波信号。

2) 有效值检测电路



注：AD8039 为电压跟随器；AD637 为均方根-直流转换器。
Note: AD8039 is voltage follower; AD637 is root mean square - direct current converter.

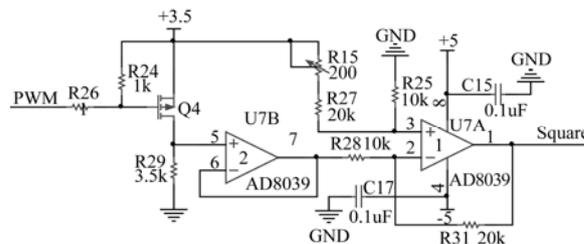
图 4 分压电阻上波形信号的有效值检测电路

Fig.4 Root mean square detecting circuit of wave signal across divider resistor

2.2.4 温度补偿

温度对溶液电导率测量影响很大，它直接影响溶液中电解质的电离度、溶解度、离子迁移速度、溶液的粘度、溶液的膨胀等，从而影响了溶液的电导率。溶液电导率具有正温度系数，对于一般电解质溶液每升高 1℃，电导率约增加 2%^[28]。

由前文可知，可通过分压电阻上波形信号的有效值来反映肥液的电导率。该有效值可通过均方根-直流转换器 AD637 进行测量，具体电路如图 4 所示。由于 AD637 的输入阻抗不高，为避免信号直接输入时对前级信号造成影响，在 AD637 的输入端前置了一个由 AD8039 构成的电压跟随器。AD637 对输入信号进行真有效值计算后，以等效的直流电压输出，然后再经电阻 R30 和 R32 分压后，送至单片机的 ADC 转换器进行电压检测。因此根据 ADC 转换器检测的电压与电导率的关系，即可反演出待测溶液的电导率。



注：Q4 为 MOS 管；U7A、U7B 为放大器。
Note: Q4 is Metal Oxide Semiconductor; U7A and U7B are amplifiers.

图 3 $\pm 3.5 \text{ V}$ 方波激励源信号产生电路

Fig.3 $\pm 3.5 \text{ V}$ square wave stimulus signal generating circuit

目前，公认 25℃为测量溶液电导率的基准温度，当溶液温度不为 25℃时，需要进行温度补偿，折换成 25℃时的电导率，其换算公式为^[29]

$$\sigma_{25} = \sigma_t / [1 + \alpha(t - 25)] \quad (4)$$

式中， σ_{25} 为溶液温度为 25℃时的电导率，S/cm； σ_t 为溶液温度为 t ℃时的电导率，S/cm； t 为溶液的温

度, °C; α 为溶液的温度系数, 一般情况下溶液温度系数 α 为 0.02。

本文采用不锈钢封装且经过防水处理的数字温度传感器 DS18B20 测量肥液的温度, 根据检测的温度利用式 (4) 自动对肥液的电导率进行补偿。

3 肥液电导率测量仪的性能测试

3.1 电导率测量仪的测量范围

由于待测溶液的电导率或温度不同, 有时也会使电极常数 k 发生变化^[30], 从而使得电导率测量仪的测量结果也可能产生一定的偏差。为确定电极 k 相对稳定的待测溶液浓度范围, 在电极的量程范围, 通过向纯水中添加 NaCl 的方式配制了一系列不同电导率的待测溶液, 对电导率测量仪进行测试试验, 同时以一个多参数测量仪 (型号为 sension156) 检测溶液的电导率, 并将其作为标准值与电导率测量仪进行对比, 其试验结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 电导率测量仪的测量结果与标准仪器的测量结果存在着一定的偏差, 同时也存在着某种关系: 在溶液电导率为 0~12.64 mS/cm 范围内, 偏差随着电导率的增大而逐渐增大, 且与标准值成极显著的线性关系, 决定系数 R^2 达 0.999; 在溶液电导率为 >12.64~17.33 mS/cm 范围内, 偏差也随着电导率的增大而增大, 但增幅逐渐减小; 在溶液电导率为 >17.33~20 mS/cm 范围内, 偏差随着电导率的增大而减小, 其变化幅度不断减小。由此说明, 电极常数 k 在待测溶液电导率为 0~12.64 mS/cm 的范围内是相对稳定的, 而 >12.64~20 mS/cm 范围内存在着波动, 因此本电导率测量仪的有效测量范围为 0~12.64 mS/cm, 并在此范围内根据所测得的试验关系标定电导率测量仪。

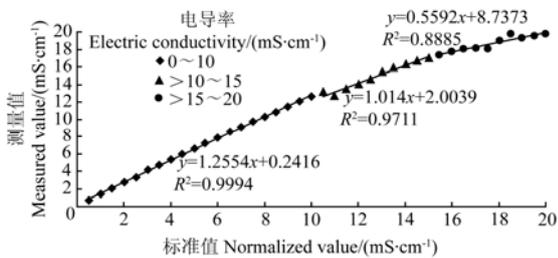


图 5 电导率的测量值与标准值的关系

Fig.5 Relationship between measured value and normalized value of EC

3.2 肥液浓度与其电导率的关系

为确定肥液浓度与电导率的具体函数关系, 以芭田中芬大量元素水溶复合肥 (氮、磷、钾三者的比例为 33:8:10) 为试验肥料, 通过兑纯净水的方式配制了质量分数为 1.0%、0.9%、0.8%、0.7%、0.6%、0.5%、0.4%、0.3%、0.2%和 0.1%的一系列待测肥

液, 并在 25°C 下分别对各个肥液进行电导率的测定试验。肥液的电导率用标准电导率仪 (型号为 sension156 的多参数测量仪) 进行测定, 试验所得的肥液浓度与电导率的关系如图 6 所示。

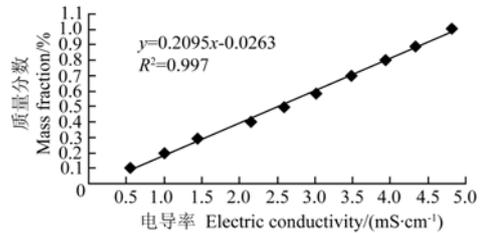


图 6 肥液浓度与其电导率的关系

Fig.6 Relationship between concentration and conductivity of liquid fertilizer

由图 6 可得, 肥液浓度与其电导率有着显著的线性关系, 决定系数 R^2 为 0.997, 具体的函数关系为

$$y=0.209x - 0.026 \quad (5)$$

式中, y 为肥液的质量分数, x 为肥液的电导率, mS/cm。因此, 电导率测量仪测得肥液的电导率后, 根据式 (5) 即可将其转换成相应的肥液浓度。

4 肥液自动混合的控制策略

采用粗细两级调节的控制策略: 首先, 利用压力变送器检测肥液自动混合装置的入口水压, 根据检测结果利用各入口压力下混肥浓度与 PWM 占空比的关系, 调节占空比对电磁阀进行 PWM 控制, 从而控制混肥浓度; 然后, 利用电导率测量仪对混合肥液的浓度进行实时检测, 并将检测结果与目标混肥浓度进行比较以计算其误差, 根据误差的大小对电磁阀 PWM 控制的占空比进行细调, 使混肥浓度尽可能逼近目标浓度。

4.1 入口水压的等效处理

由于文献[16]只标定了入口水压为 0.15、0.17、0.20、0.22 和 0.25 MPa 时混肥浓度与电磁阀 PWM 控制占空比的关系, 而混肥装置在实际应用中其入口水压不可能恒定于某一个固定值, 当入口水压变化至所标定的 5 个压力值之外时, 就会造成控制器无法根据所标定的关系来调节 PWM 占空比进行混肥。从文献[16]可知, 混肥浓度与占空比的拟合曲线在各个入口水压下的形状均比较相似, 而且各曲线之间近似于发生了整体平移。因此, 可将某个范围内的水压检测值等效为某个标定的入口水压进行粗调, 其等效对应关系如表 2 所示。

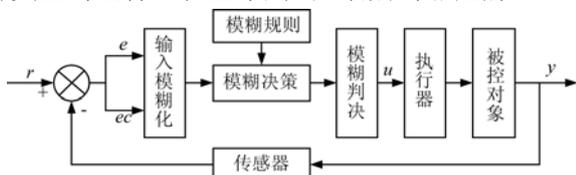
表 2 水压检测值的等效处理

检测值 Detected value /MPa	等效值 Equivalent value /MPa	检测值 Detected value /MPa	等效值 Equivalent value /MPa
0.140~0.160	0.15	>0.160~0.185	0.17
>0.185~0.210	0.20	>0.210~0.235	0.22
>0.235~0.260	0.25		

4.2 模糊控制

电磁阀 PWM 控制的占空比与混肥浓度呈二次多项式关系^[16]，而且电磁阀从接到控制信号到启动开关闭动作约有 20 ms 的延迟，此外混肥浓度随着文丘里施肥器入口压力的波动而变化，由此可见，受控对象具有非线性、滞后性和时变等特点，难以得到精确的数学模型，现通常采用模糊控制来解决此问题^[31]，因此采用模糊控制算法来进行占空比的细调。

为得到良好的控制性能，以目标浓度 r 与实测肥液浓度 y 的偏差 e 、偏差的变化量 ec 为输入变量，电磁阀 PWM 控制的占空比的调节量 u 为输出量，构建一个二维单变量模糊控制器，其原理框图如图 7 所示。 e 、 ec 和 u 的实际论域分别为 $[-2, 2]$ 、 $[-2, 2]$ 和 $[-5, 5]$ ，单位为 %。对应于 e 、 ec 和 u ，相应的模糊变量为 E 、 EC 和 U 。将 2 个输入变量和输出变量的语言值分成 7 个档级，定义为 NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、Z（零）、PS（正小）、PM（正中）和 PB（正大），即： $E=\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ， $EC=\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ， $U=\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 。每个模糊变量在其论域内可以分成若干个档级，即： $E=\{e\}=\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ 、 $EC=\{ec\}=\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 和 $U=\{u\}=\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。各变量均选择工程上常用的三角形隶属函数。



注： r 为目标浓度； e 为偏差； ec 为偏差变化量； u 为 PWM 占空比调节量； y 为实测肥液浓度。
Note: r is target concentration; e is deviation; ec is variation of deviation; u is PWM duty ratio adjustment; y is measured concentration of liquid fertilizer.

图 7 模糊控制器原理图

Fig.7 Principle of fuzzy controller

模糊控制规则的选取原则是：当误差大或较大时，选择控制量以尽快消除误差为主；而当误差较小时，选择控制量要注意防止超调，以保持系统的稳定性；误差为正与误差为负时相同，相应的符号都要变化。根据专家理论和实际经验，采用模糊条件推理 if A and B then C，得到模糊控制规则表，如表 3 所示。

模糊控制的模糊关系采用式 (6) 和式 (7) 进行运算，即

$$R_i = E_i \times EC_j \times U_{ij} \quad (6)$$

$$R_r = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (7)$$

式中， E_i 为偏差输入量， EC_j 为偏差变化量输

入量， U_{ij} 为输出量， R_i 为分模糊关系， R_r 为总模糊关系。在采用合成推理算法时，为了在实时控制中避免模糊关系矩阵合成运算时浪费大量的计算时间，先通过 MATLAB 离线计算出全部输入输出之间关系，形成一张控制输出响应表（如表 4 所示），然后通过单片机编程语言的形式将其存入控制器（MSP430F2132 单片机）中，以使控制器在某一采样时刻根据输入变量直接查询控制表即可以获得输出响应。采用最大隶属度平均值法进行解模糊化，将控制量由模糊量转化为精确量。表 4 所示的输出响应表用于调节电磁阀 PWM 控制的占空比。

表 3 模糊控制规则表

Table 3 Rules table of fuzzy control

模糊变量 E Fuzzy variable E	模糊变量 EC Fuzzy variable EC						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	Z
NS	PB	PM	PM	PS	Z	Z	NS
NZ	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NM
PZ	PM	PS	Z	Z	NS	NS	NB
PS	PS	Z	Z	NS	NS	NM	NB
PM	Z	Z	NS	NS	NM	NB	NB
PB	Z	NS	NS	/	/	NB	NB

表 4 模糊控制器的输出响应表

Table 4 Output response table of fuzzy controller

EC 模糊论域 Fuzzy domain of discourse of EC	E 的论域 Domain of discourse of E								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-3	5	5	5	5	3	2	1	0	0
-2	5	5	4	3	2	1	0	0	-1
-1	5	3	3	1	2	0	0	-1	-1
0	5	1	1	0	0	0	-1	-1	-3
1	3	1	0	0	0	-1	-1	-3	-5
2	1	0	0	-1	-1	-1	-3	-5	-5
3	0	0	-1	-3	-3	-3	-5	-5	-5

注：正数表示占空比增大，混肥浓度增大，负数表示占空比减小，混肥浓度减小。
Note: Positive indicates that duty ratio increases and mixing concentration of liquid fertilizer increases; Negative indicates that duty ratio decreases and mixing concentration of liquid fertilizer decreases.

4.3 控制流程

肥液自动控制装置的控制流程如图 8 所示，获得目标混肥浓度时，首先检测入口水压并对其进行等效处理，根据等效水压对应的 PWM 占空比控制电磁阀，对混肥浓度进行粗调；然后实时检测肥液实际浓度，并根据混肥浓度误差及其变化量，采用模糊控制算法对电磁阀的 PWM 占空比进行微调，从而进一步提高混肥的精度。同时，在微调过程中，每隔 10 s 检测 1 次入口水压，若等效水压较上一次有变动，则返回到粗调，如此循环。

5 肥液自动混合装置的验证试验

将一定量的芭田中芬大量元素水溶复合肥料溶

于水, 配制成质量分数为 20% 的水肥混合溶液作为母液, 通过自动混肥装置的人机交互界面设定不同的目标浓度进行自动混肥试验。为获得自动混肥装置的输出肥液的实际浓度, 分别在装置的入口和出口管道上各安装一个流量变送器 (型号为 LWGY-15AB, 量程为 $0.6 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 精度为 $\pm 0.5\%$), 用于检测混肥装置的入口流量和出口流量, 并以此可计算出实际的肥液浓度, 即

$$C_2 = \frac{(Q_2 - Q_1) \cdot C}{Q_2} \times 100\% \quad (8)$$

式中, Q_1 为混肥装置的入口流量, L/h; Q_2 为混肥装置的出口流量, L/h; C_2 为混肥装置的实际混肥浓度, %; C 为肥料母液的质量分数, %。

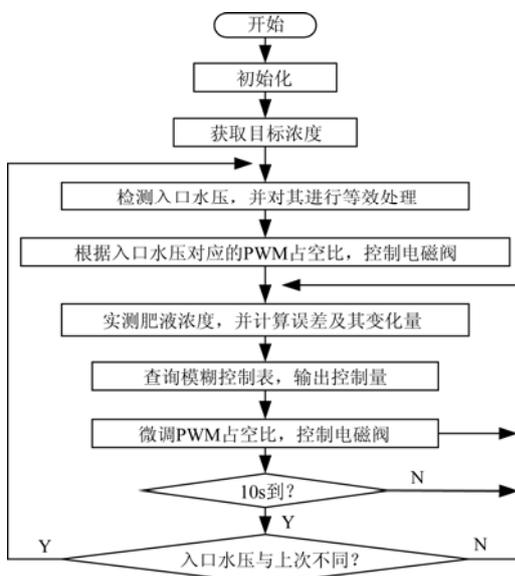


图 8 肥液自动混肥装置的程序流程图

Fig.8 Program flow chart of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer

流量变送器的输出信号由数字万用表 Keithly 2700 和多路数据采集模块 Keithly 7700 组成的数据自动采集系统每 0.1 s 自动测量一次。根据所采集的数据可得出混肥装置达到稳态的响应时间, 当某一时刻的实测混肥浓度与目标浓度的误差较小, 而且此后一段时间内实测值与目标值之差均不超过此误差, 则认为该时刻混肥装置自动混肥的控制达到稳态。

由于一般农作物灌溉施肥时的肥液浓度小于 1%, 因此本试验设置了如表 5 所示几个目标浓度进行测试验证。由试验结果知, 肥液自动混合装置进行混肥时的最大浓度误差为 0.04%, 控制装置达到稳态的响应时间为 7.8~10.4 s, 能满足实际工程应用的要求。

表 5 肥液自动混肥装置的实试验证

Table 5 Actual measurement and verify of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer

目标质量分数 Target mass fraction/%	实测质量分数 Measured mass fraction/%	质量分数误差 Mass fraction error/%	响应时间 Response time/s
0.7	0.66	-0.04	9.3
0.6	0.61	0.01	10.1
0.5	0.54	0.04	8.5
0.4	0.43	0.03	10.2
0.3	0.32	0.02	7.8
0.2	0.21	0.01	8.6
0.1	0.10	0	10.4

6 结论

1) 在之前所设计的文丘里变量施肥装置的基础上, 增加了一个实时检测肥液浓度的反馈环节, 使之构成一个闭环控制的自动混肥装置。

2) 肥液浓度采用测量其电导率的方法间接测量, 并为之设计了一个电导率测量仪。通过试验得出该电导率测量仪的有效测量范围为 $0 \sim 12.64 \text{ mS/cm}$, 肥液浓度与肥液电导率呈显著的线性关系, 其决定系数 R^2 为 0.997。

3) 装置采用粗细两级调节的控制策略进行自动混肥, 由实试验证试验知, 混肥时的最大浓度误差为 0.04%, 达到稳态的响应时间为 7.8~10.4 s, 能满足实际工程应用的要求。

[参考文献]

- 郭彦彪, 李社新, 邓兰生, 等. 自压微灌系统施肥装置[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 261-262. Guo Yanbiao, Li Shixin, Deng Lansheng, et al. Fertilizing equipment of self-press micro-irrigation system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 261-262. (in Chinese with English abstract)
- 孟一斌, 李久生, 李蓓. 微灌系统压差施肥罐施肥性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 41-45. Meng Yibin, Li Jiusheng, Li Bei. Fertilization performance of the pressure differential tank in micro-irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 41-45. (in Chinese with English abstract)
- 李富先, 吕新, 王海江, 等. 棉花膜下滴灌比例混合变量施肥系统的研发[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 115-118. Li Fuxian, Lü Xin, Wang Haijiang, et al. Research and development of the proportionally-mixed variable rate fertilization system for cotton drip irrigation under mulch film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 115-118. (in Chinese with English abstract)
- 李百军, 王晓宁. 水动施肥装置的设计与试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 9-12. Li Baijun, Wang Xiaoning. Design and experiment on hydrodynamic fertilizer injection unit[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(2): 9-12. (in Chinese with English abstract)
- 王建东, 龚时宏, 徐茂云, 等. 微灌用水动活塞式施肥泵研制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 100-103.

- Wang Jiandong, Gong Shihong, Xu Maoyun, et al. Research and development of liquamatic piston fertilizer pump for micro-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 100—103. (in Chinese with English abstract)
- [6] 唐晓群, 陈楚珍. 压力管道灌溉系统中水动施肥装置的开发[J]. 节水灌溉, 2009(10): 23—24.
- [7] 朱志坚, 卢秉恒, 赵万华, 等. 机械注入式施肥装置研制与应用[J]. 节水灌溉, 2005(2): 21—22.
Zhu Zhijian, Lu Binheng, Zhao Wanhua, et al. Development and application of mechanical injecting fertigation device[J]. Water Saving Irrigation, 2005(2): 21-22. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邵利敏, 王秀, 牛晓颖, 等. 基于 PLC 的变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 84—87.
Shao Limin, Wang Xiu, Niu Xiaoying, et al. Design and experiment on plc control system of variable rate fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 84—87. (in Chinese with English abstract)
- [9] 魏正英, 葛令行, 赵万华, 等. 灌溉施肥自动控制系统的研究与开发[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 347—349, 363.
Wei Zhengying, Ge Lingxing, Zhao Wanhua, et al. Development of automatic control system of fertigation technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3): 347—349, 363. (in Chinese with English abstract)
- [10] 严海军, 初晓一, 王敏, 等. 微灌系统文丘里施肥器吸肥性能试验[J]. 排灌机械学报, 2010, 28(3): 251—255, 264.
Yan Haijun, Chu Xiaoyi, Wang Min, et al. Injection performance of venturi injector in micro-irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 251—255, 264. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李百军, 毛罕平, 李凯. 并联文丘里管吸肥装置的研究及其参数选择[J]. 排灌机械, 2001, 19(1): 42—45.
Li Baijun, Mao Hanping, Li Kai. A study on the parallel connection venturi tube and its parameter selection[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(1): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李凯, 毛罕平, 李百军. 混药混肥装置控制性能分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 50—53.
Li Kai, Mao Hanping, Li Baijun. Analysis on control performance of various pesticide or fertilizer mixers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩启彪, 吴文勇, 刘洪禄, 等. 三种水力驱动比例式施肥泵吸肥性能试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 43—47.
Han Qibiao, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Experiment on fertilizer suction performance of three hydraulic driven pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [14] 金永奎, 夏春华, 方部玲. 文丘里施肥器系列的研制[J]. 中国农村水利水电, 2006(5): 14—16, 20.
Jin Yongkui, Xia Chunhua, Fang Buling. Research and development of venturi fertilizer applicator series[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(5): 14—16, 20. (in Chinese with English abstract)
- [15] 冯瑞珏, 洪添胜, 李加念, 等. 文丘里施肥器控制性能试验分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 11—14, 56.
Feng Ruijue, Hong Tiansheng, Li Jianian, et al. Experiment and analysis on control performance of venturi injector[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 11—14, 56. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 105—110.
Li Jianian, Hong Tiansheng, Feng Ruijue, et al. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙裔鑫, 梁春英, 王熙. 基于模糊 PID 的变量施用颗粒肥控制算法的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7435—7436.
Sun Yixin, Liang Chunying, Wang Xi. Study of variable rate grain fertilizer applicator control system based on fuzzy PID controller[J]. Journal of Anhui Agri Sci. 2011, 39(12): 7435—7436. (in Chinese with English abstract)
- [18] 梁春英, 衣淑娟. 基于模糊 PID 的变量施用液体肥控制系统研究[J]. 农机化研究, 2010(7): 41—44.
Liang Chunying, Yi Shujuan. Study of variable rate liquid fertilizer applicator control system based on fuzzy PID controller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(7): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [19] 古玉雪, 苑进, 刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 134—139.
Gu Yuxue, Yuan Jin, Liu Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 134—139. (in Chinese with English abstract)
- [20] Domingo G M, Alvaro L L, Gilberto H R, et al. Fuzzy irrigation greenhouse control system based on a field programmable gate array[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(13): 3117—3130.
- [21] 么丽丽. 基于 PLC 和 MB+ 的灌溉施肥模糊控制系统的设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
Me Lili. The Design of Irrigation and Fertilization Fuzzy Control System Based on PLC and MB+[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨青云. 基于模糊控制的 PLC 施肥灌溉控制技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Yang Qingyun. Study on PLC Fertilization and Technology Based on Fuzzy Control[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [23] 周亮亮, 柯建宏. 基于模糊控制的温室灌溉施肥控制系统[J]. 浙江农业科学, 2012(12): 1648—1652.
- [24] 张琼. 基于嵌入式的灌溉施肥系统的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
Zhang Qiong. Study on Fertigation Based on Embedded System[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [25] 雷永富. 水肥耦合灌溉控制系统的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
Lei Yongfu. Research on Water and Fertilizer Coupling Irrigation Control System[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [26] 戴建军, 樊小林, 喻建刚. 电导率法快速检测缓释复合肥养分释放的探讨[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 83—88.
Dai Jianjun, Fan Xiaolin, Yu Jiangang. Rapid test of nutrients release from polymer-coated slowed release compound fertilizer using electric conductivity[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [27] Sudduth K A, Kitchen N R, Bollero G A. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of electrical conductivity[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472—482.

- [28] 苏永慧, 刘光明. 电导率温度校正计算方法的改进[J]. 江苏环境科技, 1997(3): 45—47.
- [29] 兰敬辉. 溶液电导率测量方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [30] 王凤花, 裘正军, 邓介飞, 等. 农田土壤 pH 值和电导率采集仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 164—168.
Wang Fenghua, Qiu Zhengjun, Jie Dengfe, et al. Design and experiment on the field information pH value and electrical conductivity acquisition instrument[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 164—168. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘志壮, 洪添胜, 张文昭, 等. 机电式流量阀的模糊控制实现与测试[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 22—26.
Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Zhang Wenzhao, et al. Fuzzy control implementing and testing on electro-mechanical flow valve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.1): 22—26. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control

Li Jianian^{1,2}, Hong Tiansheng^{2,3,4*}, Feng Ruijue^{2,5}, Ni Huina²

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 4. Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou 510642, China; 5. Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Fertigation is an irrigation technology of integration of water and fertilizer, and has been widely used in micro-irrigation systems, because of uniform fertilization, high utilization of water and fertilizer, and effectively reducing the pollution of soil and environment. The venturi fertilizer injector has become one of the main means and important equipment to achieve fertigation due to its simple structure, economy, and practicability, but the liquid fertilizer concentration could not be easily adjusted automatically. In order to realize variable rate fertilization with a venturi fertilizer injector, a variable fertilizer apparatus based on PWM (pulse width modulation) technology has been developed, but the apparatus belongs to open-loop control from the perspective of automatic control, and its accuracy and stability is difficult to guarantee. Therefore, a closed-loop control automatic fertilizer-mixing device was developed to improve the liquid fertilizer concentration mixing accuracy and stability, by improving the structure of the variable fertilizer apparatus and adding a conductivity meter that was employed to feedback the real-time fertilizer solution concentration indirectly. The conductivity meter was designed based on a conductivity electrode, and a square signal whose amplitude is ± 3.5 V was determined as the excitation signal of the conductivity meter through experiments, to weaken or even eliminate polarization effects and capacitance effects of the conductivity electrode in the measuring process. In order to further improve measuring accuracy, temperature compensation had been applied to the conductivity meter, the measuring range had been divided into several small-scale ranges which could be switched by a multiplexer ADG1408 controlled by a microcontroller, and the corresponding divider resistor and square signal frequency of each small scale range were determined by experiments. By comparison with a standard conductivity meter, whose model is sension 156, the effective measuring range of the conductivity meter designed was 0-12.64 mS/cm, and the conductivity meter designed was calibrated according to the data measured in the effective measuring range. It was known that the conductivity of the fertilizer solution measured by the conductivity meter has a significant linear relationship (the coefficient of determination R^2 is 0.997) with the fertilizer solution concentration, based on conductivity testing of a series of different concentration fertilizer solutions prepared in the range of 0.1%-1.0%. In order to improve the control performance of the automatic fertilizer mixing device, a kind of control strategy of two-step regulating with coarse adjustment and fine adjustment was employed: first, the device adjusted the duty cycle of PWM for controlling the solenoid valve to mix fertilizer automatically, by calling the corresponding function based on the detected inlet water pressure; then the device uses a fuzzy control algorithm to regulate the duty cycle of PWM finely, according to the real-time fertilizer solution concentration measured by the designed conductivity meter, in order to make the mixed fertilizer concentration get close to the target concentration as much as possible. An actual test and verification had been undertaken for the fertilizer mixing device, and the results showed that the maximum error of the mixed fertilizer concentration was 0.04% and the response time of the control device for achieving steady-state was 7.8-10.4 s, and it is now known that the device can meet the requirements of practical application in agriculture.

Key words: fertilizers, fuzzy control, automation, mixing, solutions, fertilizer concentration, conductivity

(责任编辑: 张俊芳)