

压力式变量喷雾系统建模与仿真

史 岩^{1,2}, 祁力钧², 傅泽田², 谭 璇², 张小栓²

(1. 莱阳农学院工程学院, 莱阳 265200; 2 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 根据施药目标特征和机组行走速度的变化改变施药量可有效地节约农药和减轻农业生态环境对化学物质的负担。变量施药技术是当前植保机械研究的重要内容和发展方向。该文在自行设计的压力式变量喷雾系统基础上, 建立了该系统的控制数学模型, 得出了系统的传递函数, 并利用 MATLAB 对系统模型进行了仿真。结果表明, 该模型可方便地控制系统的施药量变化, 并能达到较满意的控制效果。

关键词: 施药系统; 变量喷雾; MATLAB 仿真

中图分类号: S491; TP271⁺. 3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0118-04

0 引 言

目前, 常规机动喷雾机作业过程中所有喷雾单元在喷幅内全面积定量连续喷洒, 针对不同地块、不同施药目标对施药量的不同要求, 一般采用更换喷头的办法改变施药量和控制雾滴的大小, 难以实现根据目标的具体要求实时改变施药量。农药利用率低, 易造成药液的浪费和环境污染。

为了能够根据机组行走速度的变化自动调节施药量, 达到药液均匀喷洒的目的, 美国喷雾公司 (Spraying Systems Co.) 研制的一种变量喷雾系统^[1], 采用根据机组行走速度变化实时调节施药系统供液管路压力的方法, 把喷头压力和机组前进速度联系起来, 从而获得一个基本一致的单位面积施药量。但目前这种变量喷雾系统的缺点是, 通过改变喷雾压力可在一定范围改变喷头流量, 但流量变化范围小, 且会影响喷雾质量, 即影响雾滴的大小, 由此影响雾滴的分布质量。另外, 这种变量喷雾系统各喷雾单元不能独立地调节施药量, 在施药目标的特征和机组行走速度变化较大的情况下, 难以保证施药的效果。

为了能够根据施药目标的特征和机组行走速度的变化自动调节各喷雾单元喷施药量, 达到精准施药的目的, 国外许多学者进行了大量的研究工作。D. K. Giles, et al^[2]使用一种电磁阀进行施药剂量的控制, 运用脉宽调节的方法, 通过每秒钟开闭电磁阀阀门次数来调节单个喷头的喷施药量。这种控制方法虽然可以达到各喷雾单元独立调节喷施药量的目的, 但喷头的雾流呈间歇流动状态而不是连续的流动; J. Kunavat, J. K. Schueller 等^[3]使用一种收缩阀控制每个喷头的进液通道通流面积以调节喷头喷雾压力的方法调节喷头流量。为改善收缩阀的动力学性能, 他们在收缩阀内附加了一个刚性嵌入物, 采用连续的空气压力调节以改变喷头的

进液通道流通面积来实现喷头流量的连续调节。模拟实验表明, 采用整体闭环控制单个喷头流量的方法能产生较满意的瞬态和稳态响应, 这种收缩阀可以被用于化肥或杀虫剂喷洒时的变量控制, 然而, 为了得到合适大小的雾滴和满意的分布质量, 喷头的流量变化范围必须被限定。M. E. R. Paice, P. C. H. Miller 等^[4]采用一种注射式计量系统, 通过改变药液混合比的方法调节喷施剂量。该系统把水和农药分别盛放在喷雾机上各自的容器内, 水泵以恒定压力供水到各喷头, 而在喷头进液通道的某一位置注入控制流率的农药。这样, 喷雾压力能保持恒定, 同时雾滴尺寸和喷雾分布模型不受机组前进速度的影响而改变。但是目前的注射式计量施药系统还存在着较大的喷液浓度变化的时间延迟问题, 并且为了使农药的浓度保持在允许的范围内, 不影响防治效果, 其最小药剂注入量被限定, 因此流率调节幅度较小。

为了能够根据施药目标的特征和机组行走速度的变化各个喷雾单元较大幅度且独立地调节喷施药量, 同时雾滴尺寸和喷雾分布质量不受机组前进速度的影响, 作者设计了一种压力式变量施药喷雾机器系统, 该系统主要由机器视觉系统和压力式变量喷雾系统两大部分构成。有关系统的总体设计已在另文中介绍。

本文在自行设计的压力式变量喷雾系统的基础上, 建立了压力式变量喷雾系统的控制数学模型和传递函数, 并采用 MATLAB 对其进行了仿真, 得到了较满意的控制效果。

1 压力式变量喷雾系统的工作原理

压力式变量施药喷雾机原理简图如图 1 所示。

压力式变量喷雾系统主要由盛放药剂的药箱、给药泵、比例溢流阀和通过管路相互并联的多个喷雾单元组成, 每个喷雾单元由比例减压阀、电磁阀、喷杆、压力式变量喷头、压力传感器和流量传感器构成。

在作业过程中, 比例溢流阀通过嵌入式计算机调节主管路的压力并保持一定值, CCD 摄像机将实时采集的图像信号通过图像采集卡送入计算机进行处理, 压力传感器、流量传感器、雷达传感器同步将辅助信号通过 I/O 模块送入计算机进行处理, 计算机将处理结果通过 I/O 模块把开关信号发送到安装在每个喷雾单元上的

收稿日期: 2004-03-16 修订日期: 2004-06-02

基金项目: 博士点基金和农业部 948 项目 (991066)

作者简介: 史 岩, 教授, 博士, 副院长, 山东莱阳文化路 65 号 莱阳农学院工程学院, 265200

通信作者: 祁力钧, 副教授, 博士, 北京 中国农业大学工学院 151 信箱, 100083

电磁阀, 电磁阀动作实现各喷雾单元喷雾和停喷, 计算机将施药剂量信号通过 I/O 模块发送给各喷雾单元上

的比例减压阀, 比例减压阀调节各喷雾单元的工作压力并通过压力式变量喷头实现变量喷雾。

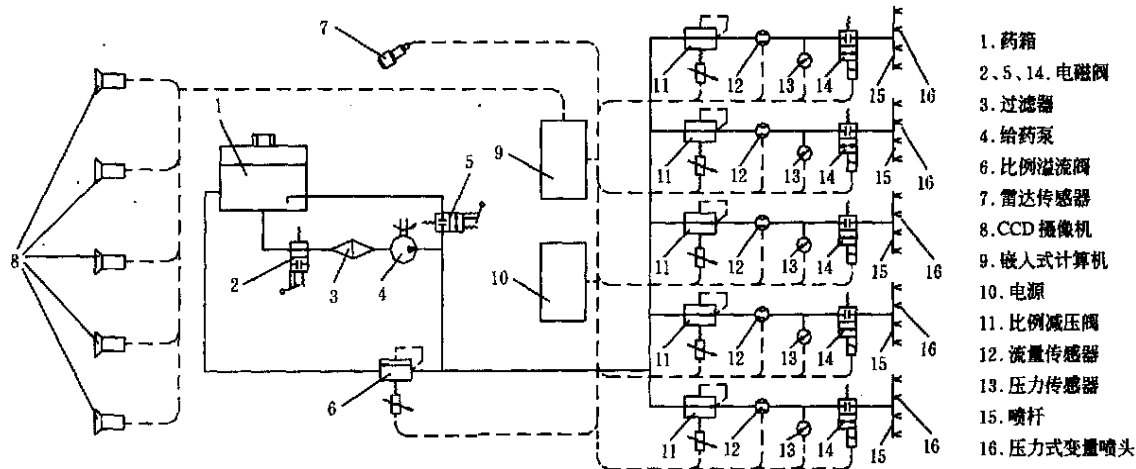


图 1 压力式变量施药喷雾机原理简图
Fig 1 Scheme of the variable spray rate system

本设计选用比例减压阀作为控制阀, 通过改变阀的控制电流, 控制阀的输出压力, 压力式变量喷头在不同输入压力下实现变量喷雾。

2 压力式变量喷雾系统的数学模型

2.1 比例减压阀的数学模型

如图 1 所示, 压力式变量喷雾系统属于比例控制系统, 此电液比例减压阀控制系统主要有控制器、电液比例减压阀(比例电磁铁、先导式减压阀)以及执行机构等组成, 比例电磁铁和先导式减压阀作为连接执行机构的元件, 具有独特的性能和结构, 并起重要作用。要使电液比例控制系统具备良好的动静态特性, 必须依据电液比例阀的特点设计控制器, 包括硬件和适合的软件。电液比例减压阀由比例电磁铁和先导式减压阀组成。由于比例电磁铁工作频率(即频宽)较高, 可以看成比例环节, 其传递函数为

$$\Delta F_e = K_I \Delta I$$

先导式减压阀的先导级平移组件的力平衡方程为

$$\Delta F_e - a_0 \Delta p_1 + a_2 (\Delta p_x - \Delta p_y) = (m_y s^2 + D_y s + K_{sy}) \Delta y \quad (1)$$

先导液桥的流量平衡方程为

$$G_1 (\Delta p_1 - \Delta p_y) + G_3 (\Delta p_x - \Delta p_y) = -K_{qp} \Delta y + K_{qp} \Delta p_y \quad (2)$$

主阀控制腔的流量平衡方程为

$$G_3 (\Delta p_x - \Delta p_y) = A_{sx} \Delta x - \frac{V_x}{E_e} s \Delta p_x \quad (3)$$

主阀芯平移组件的力平衡方程为

$$A \Delta p_1 - A_x \Delta p_x - \Delta p_y = (M s^2 + K_{sx}) \Delta x \quad (4)$$

主阀流量平衡方程为

$$\Delta Q_p - \Delta Q_L = K_{qx} \Delta x + K_{qp} \Delta p_1 + \frac{V_1}{E_e} s \Delta p_1 \quad (5)$$

式中 ΔF_e ——电磁力, N; K_I ——力—电流转换系数; ΔI ——输入电流, mA; a_0, a_2 ——液体作用的有效面积, m^2 ; m_y, D_y, K_{sy} ——分别为先导阀的质量、阻尼

和弹簧刚度, $kg, N \cdot s/m, N/m$; G_1, G_3 ——节流口的液阻, $(MPa \cdot L)/m$; K_{qx}, K_{qp} ——流量系数, mL/m ; K_{qp} ——压力流量系数, $(MPa \cdot L)/m$; A_x ——主阀芯弹簧腔有效面积, m^2 ; A ——主阀芯底有效面积, m^2 ; V_x ——主阀弹簧腔容积, m^3 ; E_e ——体积弹性模量, MPa ; V_1 ——主阀芯底面容积, m^3 ; Δy ——先导阀阀芯位移, m ; Δx ——主阀阀芯位移, m ; Δp_1 ——减压阀输出压力, MPa ; Δp_x ——主阀弹簧强压力, MPa ; Δp_y ——先导阀进口压力, MPa ; ΔQ_p ——减压阀流量, L/m ; ΔQ_L ——减压阀泄漏量, L/m ; S ——拉氏变换算子; M ——主网芯平移组件的质量, kg 。

将式(1)和(2)简化后, 得到先导级的传递函数为

$$\Delta y = \frac{\Delta F_{EM} - (a_0 + \frac{a_2 G_1}{G_1 + G_3 + K_{qp}}) \Delta p_1 + \frac{a_2 (G_1 + K_{qp})}{G_1 + G_3 + K_{qp}} \Delta p_x}{K_s (\frac{s^2}{\omega_j^2} + \frac{2\xi_j}{\omega_j} s + 1)} \quad (6)$$

$$K_s = K_{sy} + P \sqrt{K_y / m_y}$$

将式(3)~(6)简化后, 可得到图 2 所示的电液比例减压阀的传递函数方框图。

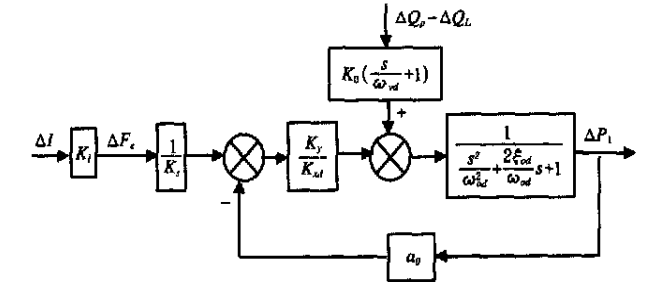


图 2 电液比例减压阀传递函数框图
Fig 2 Diagram of transfer function of the electronic liquid proportional pressure release valve

电液比例减压阀通常情况下设计频率较高,远大于系统的使用频率。本系统选用的先导式电液比例减压阀为DRE10-30B/10Y,固有频率约为8 Hz,系统的使用频率一般在1~2 Hz之间。因此先导式电液比例减压阀可看成一比例环节,其比例系数 K_i 为0.01 MPa/mA。

2.2 压力式变量喷头数学模型

如图3所示为压力式变量喷头结构示意图,分别写出阀芯的力平衡方程和阀口流量方程。

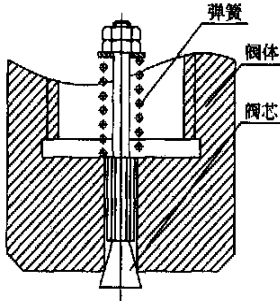


图3 压力式变量喷头结构示意图
Fig 3 Structure of the variable spray rate nozzle

1) 阀芯力平衡方程

忽略阀口的液流力和摩擦力,得到阀芯力平衡方程

$$pA = m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx \tag{7}$$

2) 阀口流量方程

$$q = C_d W x \sqrt{\frac{2}{\rho} p} \tag{8}$$

式中 p —— 变节流口的进口压力,MPa; A —— 有效作用面积, m^2 ; m —— 阀芯的等效质量,kg; c —— 阀芯的等效阻尼, $(N \cdot s)/m$; k —— 阀芯的等效弹簧刚度, N/m ; x —— 阀口位移,m; q —— 通过阀口的流量, m^3/s ; W —— 阀口的面积梯度, m ; C_d —— 流量系数; ρ —— 液体的密度, kg/m^3 。

$$A = 12.56 \times 10^{-6} m^2; m = 10.3 kg;$$

$$c = 3.4 \times 10^4 (N \cdot s)/m; k = 2.56 N/mm;$$

$$W = 1.85 \times 10^{-3} m; C_d = 0.62; \rho = 1000 kg/m^3.$$

将式(8)在工作点附近进行线性化,则

$$q = K_q x - K_c p \tag{9}$$

式中 K_q —— 流量增益, $mL/m \text{ in}$; K_c —— 流量压力系数, $(MPa \cdot L)/m \text{ in}$ 。

3) 流量连续性方程

$$q = A x + C_e p + \frac{V}{\beta_e} \frac{dp}{dt} \tag{10}$$

式中 C_e —— 泄漏系数, $(MPa \cdot L)/m \text{ in}$; β_e —— 体积弹性模量,MPa。

由于有效容积很小,泄漏量及液体的可压缩性可忽略不计。

将式(7)、(9)和(10)进行拉氏变换并整理,得到图4所示的传递函数方框图。

2.3 压力式变量喷雾系统数学模型

根据上述原理可得系统的控制原理方框图如图5

所示。

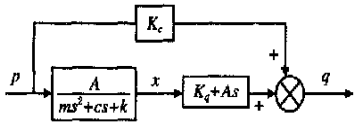


图4 压力式变量喷头传递函数框图
Fig 4 Flow chart of transfer function of variable spray rate nozzle

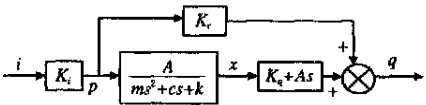


图5 系统的传递函数方框图
Fig 5 Diagram of transfer function of spray system

3 系统仿真结果与分析

经过MATLAB 仿真得到压力式变量喷雾系统的阶跃响应结果如图6所示,其响应时间约为0.2 s;频域响应结果如图7所示,其系统频宽为28.4 rad/s,约为4.5 Hz。

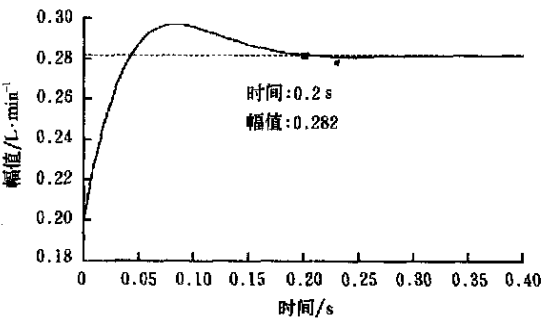


图6 压力式变量喷雾系统阶跃响应仿真结果
Fig 6 Step response simulation results

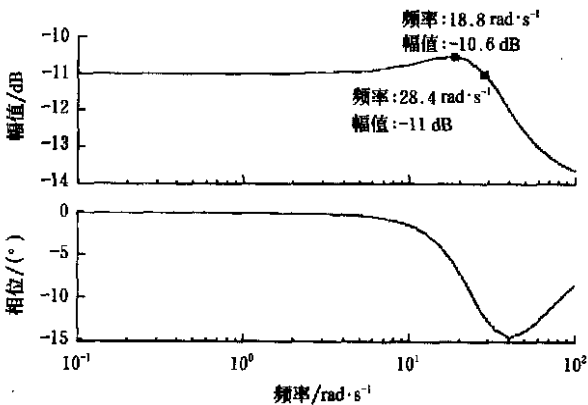


图7 频域响应仿真结果
Fig 7 Frequency range response

经过理论分析可知,本系统的工作频率低于4.5 Hz时,系统的输入输出是成比例关系的,在实际使用中也希望将系统设计成比例关系,这样就可方便的控制系统的。图8为实验结果,由图8可看出,输入量电流和输出量流量之间基本是线性关系。

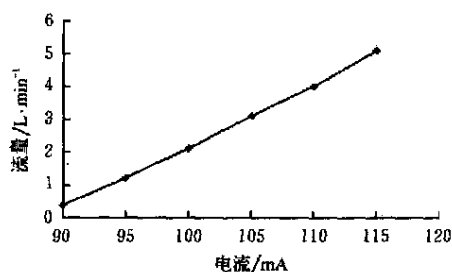


图 8 试验结果曲线

Fig 8 Experimental results

4 结 语

本文在自行设计的压力式变量施药喷雾机器系统硬件的基础上,建立了压力式变量喷雾系统的数学模型及传递函数,并用 MATLAB 对其进行了仿真。结果表明,采用电液比例减压阀控制施药系统喷雾单元的工作压力,并通过压力式变量喷头实现变量喷雾能够满足设计要求,且控制方便。可以较好地满足变量喷雾系统根据施药目标的特征和机组行走速度变化自动调节各喷雾单元喷施药量,达到精准施药的目的。

[参 考 文 献]

- [1] Installation, Programming and Operating Manual [R] Spraying Systems Co.
- [2] Gile D K, Headerson G W, Funk K. Digital control of

flow rate and spray droplet size from agricultural nozzles for precision chemical application[A]. In Proc 3rd Int Conference on precision Agriculture[C]. 1996, 729- 738

- [3] Unavut J K, schueller J K, Mason P A C. Continuous control of a sprayer pinch valve[J]. Trans of the ASAE, 2000, 43(4): 829- 837.
- [4] Paice M E R, Miller P C H, Bodle J D. A experimental sprayer for the spatially selective application of Herbicides [J]. J Agric Engng Res, 1995, 60, 107- 116
- [5] 路甬祥, 胡大宏. 电液比例控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988, 11.
- [6] 许杏文, 邱仰伟. 电液比例阀的优化[J]. 机床与液压, 2001, (3): 65- 66
- [7] 孙 亮. MATLAB 语言与控制系统仿真[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [8] Xu L, Schueller J K, Harrell R C. Dynamic response of a servovalve controlled hydraulic motor driven centrifugal pump [J]. J Dynamic Systems, Measure & Control, 1996, 118(2): 253- 258
- [9] Ha C S, Schueller J K. Reduced-order estimation and pole placement for control of a centrifugal spray pump [J]. Trans of the ASAE, 1997, 40(5): 1225- 1232
- [10] Frost A R. A Pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines[J]. J Agric Engng Res, 1990, 46, 55- 70
- [11] 陈 进, 张淑红, 李耀明, 等. 梳脱台高度自动控制系统建模与计算机仿真[J]. 农业工程学报, 2003, (6): 110- 113

Model development and simulation of variable rate of pressure spray

Shi Yan^{1,2}, Qi Lijun², Fu Zetian², Tan Yu², Zhang Xiaoshuan²

(1. Engineering School L aiyang Agricultural College, L aiyang 265200, China;

2 College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Changing spray rate in terms of the variation of spray targets and machine speed may effectively save pesticide and reduce environment pollution. Variable spray rate system will be the important tendency of pesticide application in the future. On the basis of designing a variable spray rate system, this paper developed the system control model and the system transfer function. The model was simulated successfully with the MATLAB platform. The result showed an expected effect of controlling the spray rate of the system.

Key words: spray system; variable spray rate; MATLAB simulation