

# 植保机钟摆式喷杆主动悬架自适应模糊控制

李茂源, 李树江, 郭爱静

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

**摘要:** 针对具有不确定性与参数时变性的钟摆式喷杆主动悬架系统的运动控制问题, 设计出一种基于间接型自适应模糊控制方法的喷杆位姿主动控制器; 为一种结构简单、成本低廉且应用广泛的钟摆式喷杆主动悬架系统建立了数学模型, 并在此基础上, 为了不失一般性, 对系统模型进行了输入输出线性化变换; 应用间接自适应模糊控制方法克服由于系统不确定性以及外部干扰带来的一些负面影响; 此外, 应用 Lyapunov 综合法设计控制器中调整参数的自适应律; 仿真结果表明, 所提出的控制方法具有快速响应性以及较强的自适应性和鲁棒性; 所设计的控制器有利于提高植保机的喷雾均匀性及喷杆的稳定性。

**关键词:** 钟摆式主动悬架系统; 喷杆; 自适应模糊控制; 输入输出线性化; Lyapunov 综合法

## Adaptive Fuzzy Control for Active Pendulum Suspension Systems of Spray Boom

Li Maoyuan, Li Shujiang, Guo Aijing

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Aiming at the motion control of active pendulum suspension systems with uncertainties and time-varying parameters, an active boom attitude controller based on indirect adaptive fuzzy control strategy is designed. On the basis of establishing the mathematical model of a widely used active pendulum boom suspension system with a simple structure and low cost, for the sake of generality, the input-output linearization transformation of the system model is carried out. The adaptive fuzzy control strategy is aiming to overcome some negative impacts caused by system uncertainties and external disturbances. In addition, the Lyapunov synthesis method is used to design the adaptive law of free parameters in the controller. Simulation results show that the proposed control method has fast response, strong adaptability and robustness. The designed controller is in favor of improving the spray uniformity of sprayer and the stability of spray boom.

**Keywords:** active pendulum suspension system; spray boom; adaptive fuzzy control; input-output linearization; Lyapunov synthesis method

### 0 引言

化学农药是十分重要的农业生产资料之一, 化学农药的喷洒一直以来都是农作物保护的重要途径和措施<sup>[1]</sup>。喷杆式喷雾机是一种在世界范围内广泛应用于大田植保作业的植保施药机具。喷杆式喷雾机一般具有较长的喷杆, 喷洒范围宽, 但长喷杆在田间作业时由于路面不平整等不确定因素会产生倾斜、振荡等非期望运动, 导致喷杆与农作物冠层间高度不断变化, 影响喷药分布的均匀性, 出现过喷或漏喷, 有时甚至会导致喷杆与作物碰撞, 喷杆折断, 严重影响作业效率<sup>[2-4]</sup>。

在喷杆与喷雾机之间设立悬架可以提高作业时喷杆的稳定性, 被动悬架可将喷杆与喷雾机车体的运动状态隔离开以帮助喷杆过滤掉由于地面不平整和车体振动所带来的

外部高频扰动<sup>[5-7]</sup>。为使悬架具备主动悬架功能, 在其上加装动作液压缸是一种有效的方法, 从而获得喷杆主动悬架。液压缸具有体积比小、输出力大、功率重量比高等优点, 广泛应用于现代工业的各个领域<sup>[8-10]</sup>。针对喷杆姿态的主动控制, 崔龙飞等基于比例控制建立了双钟摆主动悬架系统模型, 揭示了系统结构参数对响应特性的影响, 指导了悬架参数的科学配置<sup>[11]</sup>, 但这只属于悬架结构参数的优化; 薛涛等针对高地隙喷雾机的喷杆主动悬架系统设计了自适应模糊滑模控制器, 可以很好地隔离干扰性的车身摆动<sup>[12]</sup>, 但并未具体考查系统参数变化对控制效果的影响; 此外, 很多基于硬软件开发实现的喷杆位姿主动控制<sup>[13-15]</sup>多存在抗扰能力差、控制精度不足的问题。在面对系统模型具有非线性、不确定性以及参数时变性时, 自适应模糊控制可以发挥良好的控制性能, 对系统参数变化的敏感性低, 并具备良好的鲁棒性<sup>[16-18]</sup>。

综上所述, 本文针对一种结构简单且应用广泛的钟摆式喷杆主动悬架系统<sup>[19]</sup>进行研究, 建立其数学模型, 针对系统本身和田间路面环境存在的不确定性和时变性, 设计了一种基于输入输出线性化的间接自适应模糊控制方法<sup>[20]</sup>, 使悬架在保留被动悬架功能的同时喷杆可以精准跟踪地面

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-03-26。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700104-02)。

作者简介: 李茂源(1993-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事智能控制方向的研究。

李树江(1966-), 男, 辽宁北镇人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制技术的应用研究与开发方向的研究。

的低频坡角变化, 保持喷杆的稳定性, 且当系统参数发生时变或系统受到外部干扰时, 控制器能够具有良好的自适应性以及鲁棒性, 并通过仿真验证了控制效果。

## 1 主动悬架系统模型建立

### 1.1 系统基本方程

植保机钟摆式喷杆主动悬架结构如图 1 所示, 由喷杆、吊杆、液压缸以及与植保机车体相连的车架组成。吊杆的一端连接在车架上, 另一端连接在喷杆的重心位置, 这样吊杆就会靠自身重力作用来实现喷杆被动悬架的功能, 抑制高频扰动; 当植保机行驶在不平路面时, 通过给液压缸输入控制电压, 使液压缸内活塞杆伸缩, 调整吊杆与喷杆之间的夹角, 进而也就调节了喷杆与地面间的角度, 使喷杆与地面平行。

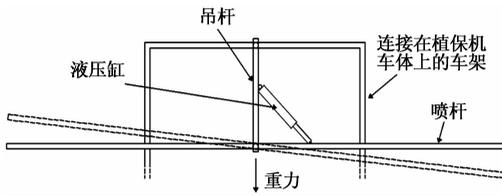


图 1 钟摆式主动悬架

采用第二类拉格朗日方程对钟摆式喷杆主动悬架系统进行动力学建模:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j \quad (1)$$

其中:  $T$  是系统动能,  $t$  为时间,  $q_j$  是广义坐标, 运算符  $d$  表示全导数, 运算符  $\partial$  表示偏导数,  $Q_j$  是对应于  $q_j$  的广义力。

用向量方式将系统的封闭运动链进行几何描述, 如图 2 所示。

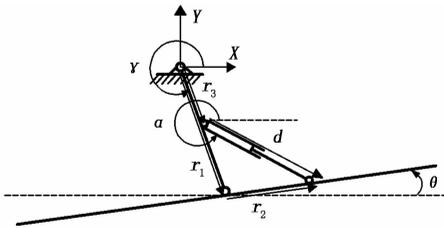


图 2 喷杆主动悬架系统几何描述

由拉格朗日乘子, 得到一组受约束的运动方程:

$$r_1 + r_2 - d - r_3 = 0 \quad (2)$$

其中: 矢量  $r_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 对应于长度固定的连杆, 矢量  $d$  对应于包含液压缸的长度可调连杆。

将系统中的各矢量根据  $x$  轴和  $y$  轴进行投影, 再经过线性化, 整理后得到下列方程:

$$r_{10}\gamma - \frac{\sqrt{2}}{2}d_0\alpha - \frac{\sqrt{2}}{2}d - r_{30}\gamma = 0 \quad (x \text{ 轴}) \quad (3)$$

$$r_{20}\theta + \frac{\sqrt{2}}{2}d_0\alpha - \frac{\sqrt{2}}{2}d = 0 \quad (y \text{ 轴}) \quad (4)$$

其中:  $r_{i0}$  是  $|r_i|$ ,  $d_0$  是  $|d|$ ,  $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$  和  $d$  表示围绕

各自设置点的变化量。为了计算公式 (1), 还需要计算动能  $T$  和广义力  $Q_j$ , 表达式如下:

$$T = \frac{I\dot{\theta}^2}{2} + \frac{mr_2^2\dot{\gamma}^2}{2} \quad (5)$$

$$Q_\theta = -mgr_1(a_1d + a_2\theta) \quad (6)$$

$$Q_d = F - mgr_1(a_3d + a_4\theta) \quad (7)$$

其中:  $I$  和  $m$  分别为喷杆的转动惯量和质量,  $g$  是重力加速度,  $Q_\theta$  是与喷杆倾角  $\theta$  相关的广义力,  $Q_d$  是与液压缸长度变化量  $d$  相关的广义力, 参数  $a_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为线性化常数,  $F$  为液压缸对喷杆的作用力, 其值随系统工作状态的不同在一定范围内变化。

根据式 (1) ~ (7), 得到钟摆式主动悬架系统运动方程如下:

$$(mr_1^2a_1a_2)\ddot{\theta} + (mr_1^2a_1^2)\ddot{d} + (mgr_1a_4)\theta + (mgr_1a_3)d = F \quad (8)$$

$$(I + mr_2^2a_2^2)\ddot{\theta} + (mr_2^2a_1a_2)\ddot{d} + (mgr_1a_2)\theta + (mgr_1a_1)d = 0 \quad (9)$$

### 1.2 系统模型状态空间描述

将主动悬架系统中液压缸的伸缩过程考虑为一阶积分环节, 控制电压  $u$  作为其输入, 有:

$$\dot{d} = \frac{k_v}{T_i}u \quad (10)$$

其中:  $T_i$  为动态时间常数,  $k_v$  为阀芯增益系数。

选取系统的状态变量  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$ ,  $x_3 = d$ , 由式 (8) ~ (10) 可以得到植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{mgr_1a_2a_4 - mgr_1a_1a_2}{a_1I}x_1 + \frac{mgr_1a_2a_3 - mgr_1a_1^2}{a_1I}x_3 - \frac{a_2}{a_1I}F \\ \dot{x}_3 = \frac{k_v}{T_i}u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 该系统的输入为液压缸控制电压  $u$ , 输出为喷杆相对于水平面的倾角  $\theta$ 。  $F$  为不确定时变参数, 时间常数  $T_i$  和增益  $k_v$  也存在不确定性。因此, 克服系统的各种不确定性和时变性, 使输出  $\theta$  跟踪期望轨迹是具有挑战性的, 也是本文所要解决的问题。

## 2 控制器设计

### 2.1 间接型自适应模糊控制

考虑如下形式的  $n$  阶非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + \\ &g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})u \\ y &= x \end{aligned} \quad (12)$$

其中:  $f$  和  $g$  是未知的连续函数,  $u \in R$  与  $y \in R$  分别是该  $n$  阶系统的输入变量和输出变量,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in R$  是该系统的状态变量。

设系统的期望输出轨迹为  $y_m$ ，并设误差为  $e = y_m - y$ ， $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$ 。

选择合适的  $K = (k_n, k_{n-1}, \dots, k_1)^T$ ，能够使多项式  $h(s) = s^n + k_1 s^{(n-1)} + \dots + k_n$  的所有根都位于复平面的左半平面上。如果函数  $f$  和  $g$  是已知的，令控制律为：

$$u = \frac{1}{g(x)}(-f(x) + y_m^{(n)} + K^T e) \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 得到闭环控制系统的方程为：

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (14)$$

选取合适的  $K$  之后，上式就意味着  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ，也就代表系统输出  $y$  会渐进地收敛于期望输出  $y_m$ 。

当函数  $f$  和  $g$  未知时，控制律 (13) 是难以实现的，因此采用模糊逻辑系统  $\hat{f}(x)$  和  $\hat{g}(x)$  替代式 (13) 中的  $f(x)$  和  $g(x)$ ，实现自适应模糊控制。所以间接型自适应模糊控制的目标是基于模糊逻辑系统设计一个反馈控制律  $u = u(x | \psi)$  以及调整参数向量  $\psi$  的自适应律，使得在全部变量即  $x(t)$ ， $\psi(t)$  以及  $u(x | \psi)$  一致有界的意义上，闭环系统具有全局稳定性，同时系统输出  $y$  能够跟踪期望输出  $y_m$ 。

### 2.2 基于输入输出线性化的模型变换

为了不失一般性，将植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的状态空间模型 (11) 进行输入输出线性化变换。输入输出线性化变换的基本思路就是对一个可控  $n$  阶系统的输出  $y$  反复求导，直到  $y$  的  $r$  阶 ( $r \leq n$ ) 导数与输入  $u$  之间能够建立直接联系，此时称这个系统的相对阶数为  $r$ 。

根据式 (11)，对植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的输出  $y$  逐次求导：

$$\begin{aligned} y &= x_1 \\ \dot{y} &= x_2 \\ \ddot{y} &= \dot{x}_2 = \frac{mgr_1 a_2 a_4 - mgr_1 a_1 a_2}{a_1 I} x_1 + \\ &\quad \frac{mgr_1 a_2 a_3 - mgr_1 a_1^2}{a_1 I} x_3 - \frac{a_2}{a_1 I} F \end{aligned} \quad (15)$$

进而有：

$$\begin{aligned} y^{(3)} &= \frac{mgr_1 a_2 a_4 - mgr_1 a_1 a_2}{a_1 I} x_2 - \frac{a_2}{a_1 I} \dot{F} + \\ &\quad \frac{k_v(mgr_1 a_2 a_3 - mgr_1 a_1^2)}{T a_1 I} u \end{aligned} \quad (16)$$

由式 (15)、(16) 可以看出，植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的相对阶数  $r = n = 3$ ，系统无内动态。将式 (16) 写成如下形式：

$$y^{(3)} = f(x) + g(x)u, x = (x_1, x_2, x_3)^T \quad (17)$$

考虑悬架结构中液压缸对喷杆的作用力  $F$  随系统工况不同在小范围内缓慢变化，为方便控制器设计，将其视为一个定值，即  $\dot{F} = 0$ ，从而此时在式 (17) 中：

$$f(x) = \frac{mgr_1 a_2 a_4 - mgr_1 a_1 a_2}{a_1 I} \quad (18)$$

$$g(x) = \frac{k_v(mgr_1 a_2 a_3 - mgr_1 a_1^2)}{T a_1 I} \quad (19)$$

那么便可以把控制律选为式 (13)，考虑到钟摆式喷杆主动悬架系统模型的不确定性，利用模糊逻辑系统  $\hat{f}(x)$  和  $\hat{g}(x)$  来逼近  $f(x)$  和  $g(x)$ ，再发展一套自适应律调整模糊逻辑系统的参数，就可以使输出喷杆倾角  $y$  跟踪期望的喷杆倾角轨迹  $y_m$ 。

### 2.3 模糊控制器的设计

用模糊逻辑系统  $\hat{f}(x | \psi_f)$  和  $\hat{g}(x | \psi_g)$  分别替换式 (13) 中的  $f(x)$  和  $g(x)$ ，其中  $\psi_f, \psi_g$  为调整参数向量，则植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的反馈控制律为：

$$u = \frac{1}{\hat{g}(x | \psi_g)}(-\hat{f}(x | \psi_f) + y_m^{(3)} + K^T e) \quad (20)$$

若要实现控制律式 (20)，需要设计模糊逻辑系统  $\hat{f}(x | \psi_f)$  和  $\hat{g}(x | \psi_g)$  的具体表达式。首先构造用于逼近  $f(x)$  的模糊逻辑系统  $\hat{f}(x | \psi_f)$ ，主要分为以下两步。

步骤 1：对植保机钟摆式喷杆主动悬架系统的状态变量  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 设定  $p_i$  个模糊集合  $A_i^l$  ( $l=1, 2, \dots, p_i$ )，其隶属函数为  $\mu_{A_i^l}^i$ ，且均匀地覆盖  $R_i$ ， $R_i$  为  $R$  在  $i$  分量上的投影；

步骤 2：采用以下  $\prod_{i=1}^3 p_i$  条模糊规则构造模糊逻辑系统  $\hat{f}(x | \psi_f)$ ：

如果  $x_1$  为  $A_1^{l_1}$  且  $x_2$  为  $A_2^{l_2}$  且  $x_3$  为  $A_3^{l_3}$ ，则  $\hat{f}$  为  $G^{(l_1, l_2, l_3)}$ 。

其中： $l_i=1, 2, \dots, p_i$  ( $i=1, 2, 3$ )。

选用单值模糊器，应用乘积推理公式以及中心平均解模糊公式，则模糊逻辑系统的输出为：

$$\hat{f}(x | \psi_f) = \frac{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_3=1}^{p_3} \bar{y}_f^{l_1, \dots, l_3} (\prod_{i=1}^3 \mu_{A_i^{l_i}}^i(x_i))}{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_3=1}^{p_3} (\prod_{i=1}^3 \mu_{A_i^{l_i}}^i(x_i))} \quad (21)$$

令  $\bar{y}_f^{l_1, \dots, l_3}$  为自由调整参数，放到集合  $\psi_f \in R^{\prod_{i=1}^3 p_i}$  中，可将式 (21) 变成如下形式：

$$\hat{f}(x | \psi_f) = \psi_f^T \xi(x) \quad (22)$$

式 (22) 中， $\xi(x)$  为  $\prod_{i=1}^3 p_i$  维向量，称为模糊基函数向量，其第  $l_1, \dots, l_3$  个元素为：

$$\xi_{l_1, \dots, l_3}(x) = \frac{\prod_{i=1}^3 \mu_{A_i^{l_i}}^i(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{p_1} \dots \sum_{l_3=1}^{p_3} (\prod_{i=1}^3 \mu_{A_i^{l_i}}^i(x_i))} \quad (23)$$

同理，模糊逻辑系统  $\hat{g}(x | \psi_g)$  可以构造为下式：

$$\hat{g}(x | \psi_g) = \psi_g^T \xi(x) \quad (24)$$

### 2.4 稳定性分析及自适应律设计

将反馈控制律 (20) 代入式 (17)，得到钟摆式主动悬架模糊控制系统的闭环动态表达式如下：

$$e^{(3)} = -K^T e + \hat{f}(x | \psi_f) - f(x) + (\hat{g}(x | \psi_g) - g(x))u \quad (25)$$

令：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_3 & -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

则式 (25) 以向量形式可表达为:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \Lambda e + \mathbf{b}(\hat{f}(x | \psi_f) - f(x)) + \\ & b(\hat{g}(x | \psi_g) - g(x))u \end{aligned} \quad (27)$$

定义最优参数为:

$$\begin{aligned} \psi_f^* &= \operatorname{argmin}_{\psi_f \in \Omega_f} \{ \sup_{x \in R} | \hat{f}(x | \psi_f) - f(x) | \} \\ \psi_g^* &= \operatorname{argmin}_{\psi_g \in \Omega_g} \{ \sup_{x \in R} | \hat{g}(x | \psi_g) - g(x) | \} \end{aligned} \quad (28)$$

式 (28) 中,  $\Omega_f$  和  $\Omega_g$  分别为  $\psi_f$  和  $\psi_g$  的集合。 $\hat{f}(x | \psi_f^*)$  和  $\hat{g}(x | \psi_g^*)$  分别为  $f(x)$  和  $g(x)$  的最优逼近函数。下面定义最小逼近误差为:

$$\omega = (\hat{f}(x | \psi_f^*) - f(x)) + (\hat{g}(x | \psi_g^*) - g(x))u \quad (29)$$

将式 (29) 代入式 (27) 中, 得:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \Lambda e + b(\hat{f}(x | \psi_f) - \hat{f}(x | \psi_f^*)) + b(\hat{g}(x | \psi_g) - \\ & \hat{g}(x | \psi_g^*))u + b\omega \end{aligned} \quad (30)$$

把式 (22) 和 (24) 代入式 (30) 中, 得到闭环动态方程为:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \Lambda e + b(\psi_f - \psi_f^*)^T \xi(x) + \\ & b(\psi_g - \psi_g^*)^T \xi(x)u + b\omega \end{aligned} \quad (31)$$

从式 (31) 可以清楚地看到喷杆倾角的跟踪误差与控制器中参数  $\psi_f$  和  $\psi_g$  之间的关系, 自适应律的目标就是为  $\psi_f$  和  $\psi_g$  确定一个调节机制, 使得植保机的喷杆倾角跟踪误差  $e$  与控制器参数偏差  $\psi_f - \psi_f^*$  和  $\psi_g - \psi_g^*$  达到最小。为了完成这一目标, 定义 Lyapunov 函数如下:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 = \\ & \frac{1}{2}e^T P e + \frac{1}{2\gamma_1}(\psi_f - \psi_f^*)^T (\psi_f - \psi_f^*) + \\ & \frac{1}{2\gamma_2}(\psi_g - \psi_g^*)^T (\psi_g - \psi_g^*) \end{aligned} \quad (32)$$

其中:  $\gamma_1$  与  $\gamma_2$  均为正常数,  $P$  是正定矩阵并满足 Lyapunov 方程:

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q \quad (33)$$

其中:  $Q$  是一个任意的 3 阶正定矩阵,  $\Lambda$  如式 (26) 所示。对  $V$  求关于时间的导数  $\dot{V}$ , 并将式 (31) 代入  $\dot{V}$  中得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 = \frac{1}{2}\dot{e}^T P e + \frac{1}{2}e^T P \dot{e} + \\ & \frac{1}{\gamma_1}(\psi_f - \psi_f^*)^T \dot{\psi}_f + \frac{1}{\gamma_2}(\psi_g - \psi_g^*)^T \dot{\psi}_g = \\ & \frac{1}{2}e^T (\Lambda^T P + P \Lambda) e + e^T P b [(\psi_f - \psi_f^*)^T \xi(x) + \\ & (\psi_g - \psi_g^*)^T \xi(x)u + \omega] + \\ & \frac{1}{\gamma_1}(\psi_f - \psi_f^*)^T \dot{\psi}_f + \frac{1}{\gamma_2}(\psi_g - \psi_g^*)^T \dot{\psi}_g = \\ & -\frac{1}{2}e^T Q e + e^T P b \omega + \\ & \frac{1}{\gamma_1}(\psi_f - \psi_f^*)^T [\dot{\psi}_f + \gamma_1 e^T P b \xi(x)] + \\ & \frac{1}{\gamma_2}(\psi_g - \psi_g^*)^T [\dot{\psi}_g + \gamma_2 e^T P b \xi(x)u] \end{aligned} \quad (34)$$

由式 (34), 为使  $V$  最小, 从而使喷杆倾角跟踪误差  $e$  和参数误差  $\psi_f - \psi_f^*$ 、 $\psi_g - \psi_g^*$  达到最小, 应选择使  $\dot{V}$  为负值的自适应律。由于  $-\frac{1}{2}e^T Q e \leq 0$ , 又根据万能逼近定理, 可以选择尽可能复杂的模糊系统使  $\omega$  的值非常小, 那么一个合适的方案是选择自适应律使式 (34) 的最后两项为零, 从而就实现了  $\dot{V} \leq 0$ 。选择的自适应律式如下:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_f &= -\gamma_1 e^T P b \xi(x) \\ \dot{\psi}_g &= -\gamma_2 e^T P b \xi(x)u \end{aligned} \quad (35)$$

在实现了  $\dot{V} \leq 0$  之后, 闭环系统具备了稳定性, 从而系统中  $y = (y, \dot{y}, \ddot{y})^T$ ,  $\psi(t)$  和  $u(x | \psi)$  对所有的  $t \geq 0$  一致有界, 又根据式 (15) 所示的  $y = (y, \dot{y}, \ddot{y})^T$  与  $x = (x_1, x_2, x_3)^T$  之间的关系, 得出  $x = (x_1, x_2, x_3)^T$  也即  $\theta$ 、 $\dot{\theta}$  和  $d$  对所有的  $t \geq 0$  也是一致有界的。因此, 系统具有全局稳定性。植保机钟摆式主动悬架喷杆位姿控制系统结构如图 3 所示。

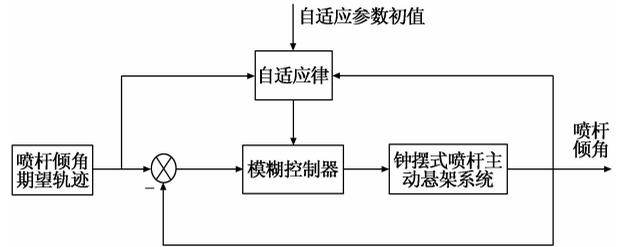


图 3 喷杆倾角控制系统结构图

### 3 仿真分析

#### 3.1 系统模型及控制器参数

对于钟摆式喷杆主动悬架, 其相关参数如表 1 所示。

表 1 钟摆式喷杆主动悬架系统参数

参数/单位	值	参数/单位	值
$m/\text{kg}$	600	$g/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	9.8
$I/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	33 000	$r_1/\text{m}$	1.4
$F/\text{N}$	3 000	$k_v/\text{m} \cdot \text{v}^{-1}$	$3 \times 10^{-4}$
$T_i/\text{s}$	0.004		

依照表 1 所示的系统模型参数, 取系统状态变量  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$  的取值区间为  $[-\pi/6, \pi/6]$ ,  $x_3 = d$  的取值区间为  $[-0.35, 0.35]$ 。选择  $p_1 = p_2 = 5$ ,  $p_3 = 3$ 。对于  $i=1, 2$ , 均有  $|x_i| \leq \pi/6$ , 因此选择  $x_1, x_2$  的各隶属函数如下:

$$\mu_{\lambda_1}^j(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i + \pi/6 - (j-1) * \pi/12}{\pi/24}\right)^2\right] \quad (36)$$

其中:  $j=1, 2, \dots, 5, i=1, 2$ ;

选择  $x_3$  的各隶属函数如下:

$$\mu_{\lambda_1}^1(x_3) = \exp\left[-\left(\frac{x_3 + 0.35}{0.175}\right)^2\right] \quad (37)$$

$$\mu_{\lambda_1}^2(x_3) = \exp\left[-\left(\frac{x_3}{0.13}\right)^2\right] \quad (38)$$

$$\mu_{\lambda_1}^3(x_3) = \exp\left[-\left(\frac{x_3 - 0.35}{0.175}\right)^2\right] \quad (39)$$

则用于逼近  $f(x)$  和  $g(x)$  的模糊规则各有 75 条。 $\phi_f$  和  $\phi_g$  中各个元素的初值分别取 0 和 0.1, 采用控制律式 (20), 自适应律采用式 (35), 取  $Q$  为三阶单位矩阵,  $k_1 = 6, k_2 = 10, k_3 = 6$ 。取自适应参数  $\gamma_1 = 0.1, \gamma_2 = 0.2$ 。

### 3.2 仿真分析

使用 Matlab/Simulink 搭建控制系统仿真模型, 验证所设计控制器的有效性。

设定期望的喷杆倾角输出轨迹为  $y_m = 0$  (rad), 即希望喷杆能够保持水平状态, 实现喷杆的镇定。取系统的初始状态  $x_0 = [-0.2, 0.1, 0.1]^T$ , 就是将喷杆的倾角  $\theta = -0.2$  rad, 角速度  $\dot{\theta} = 0.1$  rad/s 液压缸位置  $d = 0.1$  m 作为主动悬架系统的初始状态进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

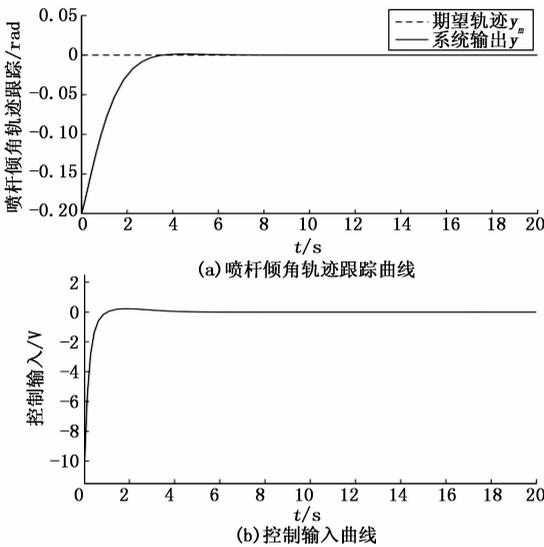


图 4 喷杆镇定仿真结果图 1

改变系统初始状态中喷杆的角速度为  $\dot{\theta} = -0.1$  rad/s, 表示当喷杆初始的旋转方向与期望轨迹方向相反时, 仿真结果如图 5 所示。

从图 4、图 5 可以看出, 所设计的控制器可以短时间内使喷杆镇定, 当喷杆的初始旋转方向与镇定方向相同时, 控制器可以在 4 s 内使喷杆达到满意的镇定效果, 当喷杆的初始旋转方向与镇定方向相反时, 控制器可以在 5 s 内使喷杆镇定, 这反映了实际喷杆倾角跟踪的效果也与当前系统的状态有关。

考虑到实际田间路面倾斜角不断变化, 为了验证在控制器作用下系统的喷杆倾角跟踪性能, 令期望轨迹  $y_m = 0.2 \sin(1.2t)$  (rad), 取初始状态  $x_0 = [0.2, 0, -0.1]^T$ , 即喷杆初始的倾角  $\theta = 0.2$  rad, 角速度  $\dot{\theta} = 0$  rad/s, 液压缸位置  $d = -0.1$  m, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 在控制器作用下, 喷杆倾角跟踪呈正弦规律变化的地面坡角效果良好。

假设在植保机稳定运行至第 10 s 时, 液压系统出现漏油情况, 从而影响液压缸对喷杆的作用力, 导致系统模型

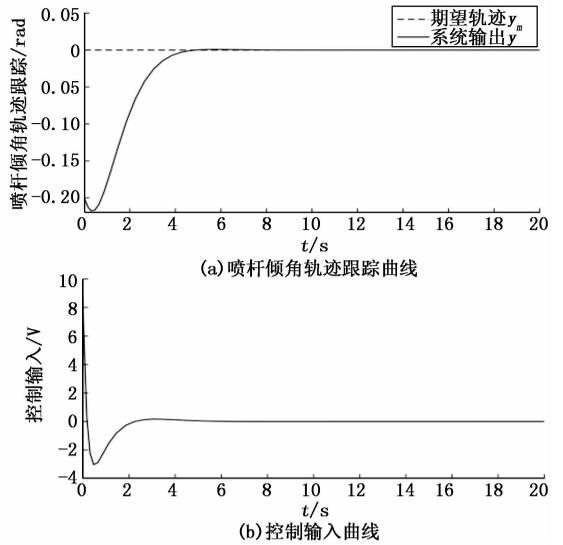


图 5 喷杆镇定仿真结果图 2

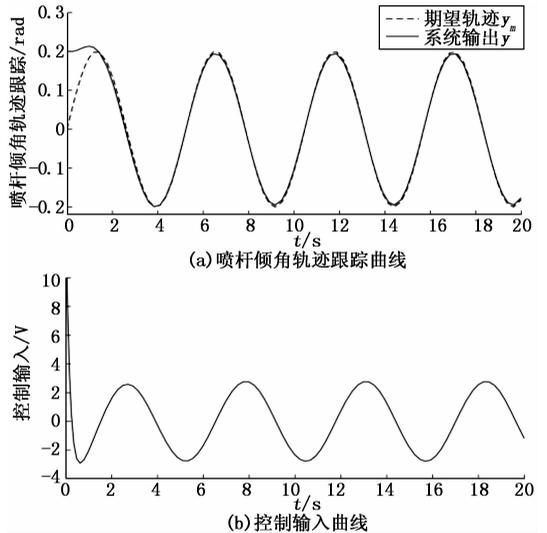


图 6 喷杆倾角正弦函数跟踪效果图

中的  $F$  发生变化。

考虑液压系统漏油情况, 为验证控制器的自适应性, 再取期望轨迹  $y_m = 0$  rad, 系统初始状态  $x_0 = [-0.2, 0.1, 0.1]^T$ , 仿真结果如图 7 所示。

由图 7 对照图 4 可以看出, 在第 10 s 时由于系统模型的突然变化导致喷杆的镇定出现了些微的偏差, 但通过控制器的快速响应, 控制输入的迅速补偿, 使喷杆经过重新调整后再次回到镇定状态并保持稳定。

考虑液压系统漏油情况, 再取喷杆倾角的期望轨迹为  $y_m = 0.2 \sin(1.2t)$  (rad), 系统的初始状态为  $x_0 = [0.2, 0, -0.1]^T$  时, 对应的仿真结果如图 8 所示。

由图 8 对照图 6 可以看出, 在第 10 s 时通过控制器的快速响应, 系统模型的突然变化几乎没有给喷杆倾角的跟踪效果带来影响。

考虑实际中受到作物叶片遮挡等因素的影响, 喷杆两

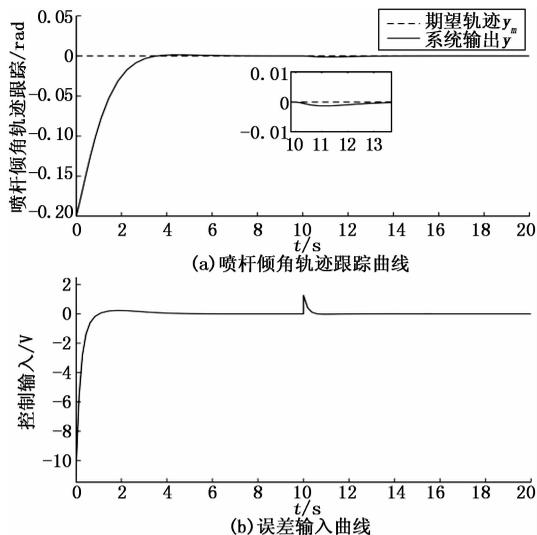


图 7 液压系统漏油情况下的喷杆镇定

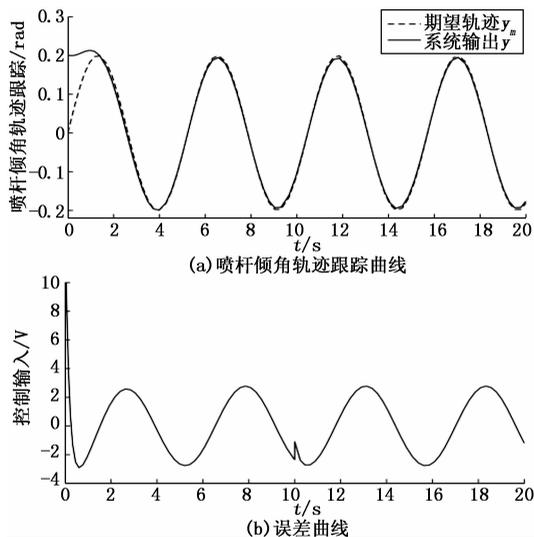


图 8 液压系统漏油情况下的正弦轨迹跟踪

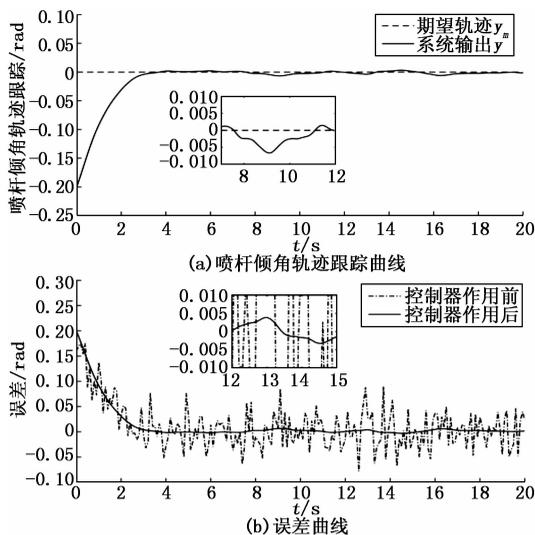


图 9 方差为 0.001 的白噪声干扰下喷杆镇定仿真图

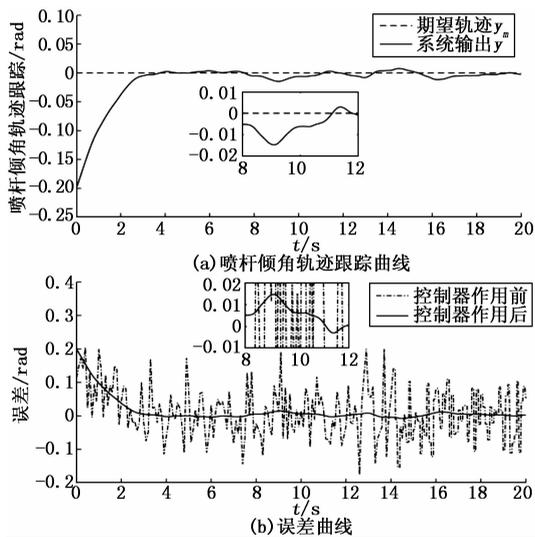


图 10 方差为 0.005 的白噪声干扰下喷杆镇定仿真图

侧的测距传感器不免产生测量误差, 导致系统反馈的喷杆倾角与喷杆实际倾角具有一定偏差。为考查这种情况下控制器的控制效果, 在仿真系统的喷杆倾角输出信号上加一个均值为 0 rad, 采样时间为 0.1 s 的高斯型白噪声干扰信号, 来模拟实际中喷杆倾角存在测量误差的情况。

当白噪声信号的方差为 0.001 时, 仿真结果如图 9 所示。

由图 9 (b) 可以看出, 在均值为 0 rad, 方差为 0.001 的白噪声干扰下, 系统反馈的喷杆倾角值不断产生误差, 误差最大达到 0.09 rad (5.16°), 但如图 9 (a) 所示, 喷杆的镇定虽然受到了测量白噪声干扰的影响, 但喷杆镇定最大的偏离幅度只有 0.006 7 rad (0.38°)。

扩大干扰白噪声信号的幅值波动幅度, 取方差为 0.005, 仿真结果如图 10 所示, 可以看出, 喷杆倾角测量误差最大可达 0.2 rad (11.5°), 而喷杆镇定所表现的最大偏离幅度只有 0.0147 rad (0.84°), 可见系统具有很强的鲁棒性。

#### 4 结束语

文中针对一种结构简单且应用广泛的植保机钟摆式喷杆主动悬架系统进行研究, 建立了其状态空间模型, 在此基础上设计了一种基于输入输出线性化的间接自适应模糊控制方法。通过仿真验证了在系统模型存在不确定性和参数时变性的情况下, 所设计的间接自适应模糊控制器能够使钟摆式喷杆主动悬架系统具有良好的信号跟踪性能, 并具备良好的控制精度、稳定性、自适应性以及鲁棒性, 具有实际应用价值。

#### 参考文献:

[1] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策 [J]. 中国生态农业学报, 2019, 27 (2): 236-245.  
 [2] 庄腾飞, 杨学军, 董祥, 等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (s1): 189-198.