

高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验

沈 跃¹ 何思伟¹ 刘 慧¹ 崔业民²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 南通广益机电有限责任公司, 南通 226631)

摘要: 针对传统机械传动式高地隙喷雾机底盘在水田环境行走时容易陷入泥泞和深沟的问题,设计了一种四轮独立电驱动自转向电动底盘。底盘转向机构由可自转向的前后桥构成,根据自转向机构特点,提出了底盘部分动力学建模方法,将未建模动态以及外部扰动合并为总扰动,构建扩张状态观测器(Extended state observer, ESO),实时估计总扰动并进行扰动补偿,再对无扰动的线性模型设计串级比例控制器,进行模型参数辨识与控制验证。仿真结果表明,采用阶跃信号模拟扰动,ESO 扰动观测值可在 0.5 s 内收敛到实际扰动;扰动观测器收敛后,当期望转角从 0° 突加至 20° 时,得到转角跟踪控制响应曲线的上升时间为 1.9 s,超调量为 2.3%。试验表明,喷雾机以 1 m/s 的速度行驶在平坦路面时,前转向桥转角上升时间为 3.1 s,后转向桥转角上升时间为 2.0 s,说明本控制方法具有较好的控制效果;喷雾机在满载的情况下工作在泥泞田间时,可以越过宽 20 cm、深 40 cm 的泥泞深沟,说明其在田间具有良好的通过性。

关键词: 高地隙喷雾机; 自转向电动底盘; 电驱动; 扩张状态观测器; 控制系统

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0385-08 OSID: 

Modeling and Control of Self-steering Electric Chassis Structure of High Clearance Sprayer

SHEN Yue¹ HE Siwei¹ LIU Hui¹ CUI Yemin²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Nantong Guangyi Mechanical and Electrical Co., Ltd., Nantong 226631, China)

Abstract: At present, the chassis of the high clearance sprayer mostly adopts the traditional four-wheel steering structure. When working in the complex paddy field environment, the sprayer often gets stuck in the mud and cannot turn. A new type of chassis based on four wheel independent electric drive steering structure was designed. The chassis consisted of three main parts, the front and rear steering structure and the frame. The front and rear steering mechanism was connected to the frame by plane bearings, so that the steering mechanism can freely rotate around the fixed point on the frame. The four wheels were fixed on the front and rear steering mechanism, and the steering control purpose can be achieved by controlling the output torque of the four wheels. According to the characteristics of the structure, a modeling and control method was proposed. The two steering mechanisms were modeled separately, and part of their dynamic models were obtained. The unmodeled dynamics and external disturbances were regarded as total disturbances, and then an extended state observer (ESO) was designed to observe the total disturbances. Then the output was used to cancel out the total disturbance, and the undisturbed linear model was obtained. Then a cascade proportion controller was designed to control the steering. Finally, Matlab was used to identify and simulate system parameters and carry out physical verification. The simulation results showed that when the step signal was used to simulate the disturbance, the observed value of the disturbance can converge to the actual disturbance within 0.5 s. After the disturbance observer converged, when the expected turning angle was suddenly increased from 0° to 20°, the rising time of the turning angle tracking control response curve was 1.9 s, and the overshoot was 2.3%. The test results showed that when the sprayer was traveling on a flat road at speed of 1 m/s, the

收稿日期: 2020-02-10 修回日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)、江苏省重点研发计划项目(BE2018372)、江苏省自然科学基金项目(BK20181443)、江苏高校青蓝工程项目、江苏省农机三新工程项目(NJ2018-12)和镇江市重点研发计划项目(NY2018001)

作者简介: 沈跃(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事无人农机与智能控制和农业机器人研究,E-mail: shen@ujs.edu.cn

rise time of the steering angle of the front steering mechanism was 3.1 s, and the rise time of the angle of rear steering mechanism was 2.0 s, which verified that the control method had a good control effect. When it was working in the field under full load, it can easily cross a muddy deep trench with width of 20 cm and depth of 40 cm, which verified that it had good passing ability in the field.

Key words: high clearance sprayer; self-steering electric chassis; electric drive; extended state observer; control system

0 引言

目前,我国的植保机械仍以背负式手动喷雾器和背负式机动弥雾机为主^[1-3]。与传统人工施药相比,高地隙喷雾机具有作业效率高、施药均匀性好、对施药人员健康危害小等优点,已成为大田高秆类作物的重要施药机械^[4-9],国内外学者对此进行了广泛的研究。张京等^[10]设计了一种农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统,每个移动轮采用2个电机完成行走与转向功能,并基于低速阿克曼四轮转向模型与PID控制算法分析并验证了该四轮独立转向驱动控制策略的有效性;范国强等^[11]针对玉米和甘蔗等高秆作物生长中后期田间管理缺乏有效作业机械的问题,设计了一种四轮菱形布置的农用高地隙作业机,并进行了试验,该机采用门架式结构,具有离地间隙高、重心低、转向半径小和抗侧翻能力强的优点;YE等^[12]开发了一种适用于果园的四轮独立转向系统,其转向结构与文献[11]设计的高地隙作业机类似,只是其转向与前进的动力来源于液压系统,而非电机;许超等^[13]设计了离地间隙2 m的自走式喷杆喷雾机,整机采用基于前轮轮距可调机构的双液压缸转向系统和后轮驱动方式,为解决玉米等高秆作物生长后期无法施药的难题奠定了基础;李伟等^[14]为提高喷雾机的机动性能和作业效率,设计了一套全液压多轮转向系统,并提出了基于PID控制方法的四轮转向系统控制方法;刘志刚等^[15]设计一种喷雾机底盘液压传动系统,该系统具有高低速行驶、驻车制动、防打滑等功能。上述结构底盘转向系统均是采用外部助力转向,文献[16-17]也采用了类似的设计。

对高地隙底盘结构的研究已经较为普遍,但高地隙底盘在复杂水田作业环境中存在转向困难,仍容易陷入泥泞和深沟^[18-19],从而无法正常行驶。本文设计一种高地隙四轮独立驱动自转向机构电动底盘,针对其结构特点提出部分动力学建模的方法,然后设计ESO,利用输出进行扰动补偿,对无扰动的线性模型设计串级比例控制器,并通过试验验证本文方法的有效性。

1 数学建模

1.1 电动底盘自转向机构设计

高地隙喷雾机自转向电动底盘实物图如图1

所示。蓄电池组由6组标称12 V铅蓄电池组串连组成,主要承担在发电机未工作时提供电能以及在发电机工作时储存多余电能和稳定发电机输出电压的作用;为了解决无刷直流电机直驱转矩小的问题,设计了内部有行星齿轮同轴变速的轮毂电机,4 kW无刷直流电机内嵌在轮毂电机中,电机输出的动力经过减速比为9的行星齿轮后放大输出,车轮半径为0.46 m;发电机功率28.5 kW,可以为喷雾机连续工作提供充足电能;车架长2.8 m,宽1.4 m,工作设备皆安装在车架上。



图1 高地隙自转向电动底盘实物图

Fig.1 Picture of high clearance self-steering electric chassis

1. 蓄电池组 2. 右后轮 3. 右前轮 4. 发电机 5. 车架 6. 左后轮 7. 左前轮

底盘自转向机构由3部分组成:底盘车架(图2)和前转向桥和后转向桥(图3),其中前后转向桥机构一致。前转向桥通过平面轴承在前桥转向中心点A与车架连接,后转向桥与车架在后桥转向中心点B连接。

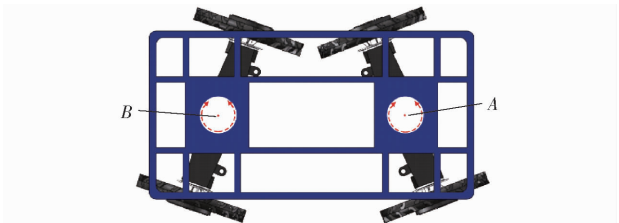


图2 底盘车架

Fig.2 Chassis frame

高地隙喷雾机自转向机构采用4个轮毂电机驱动,每个电机的转矩均可独立控制。4个电机分为前后2组,分别为左前、右前、左后和右后,左前电机和右前电机安装在前转向桥上,左后电机和右后电机安装在后转向桥上。前后转向桥通过平面轴承与车架连接在一起,并且每个电机的转矩均独立可控,

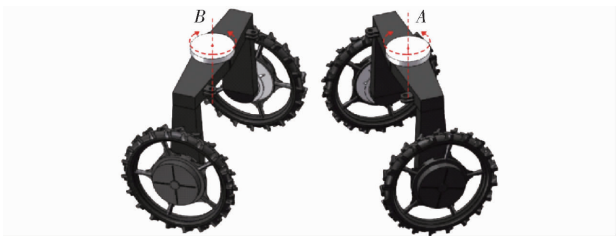


图 3 前、后转向桥
Fig. 3 Front/rear steering axle

因此可以通过控制安装于转向桥两侧的轮毂电机的转速来调节转向桥与车架的夹角。通过控制转向桥与车架夹角便可以达到控制喷雾机转向的目的。转向机构由前后 4 个电驱动轮两两安装在前后转向桥,并协同完成自转向,没有方向盘,无需额外转向动力。

高地隙喷雾机实物图如图 4 所示,喷杆长度 11.2 m,喷幅 12 m;药箱容积 500 L;高地隙喷雾机实物质量 1 380 kg,离地间隙 1.1 m。

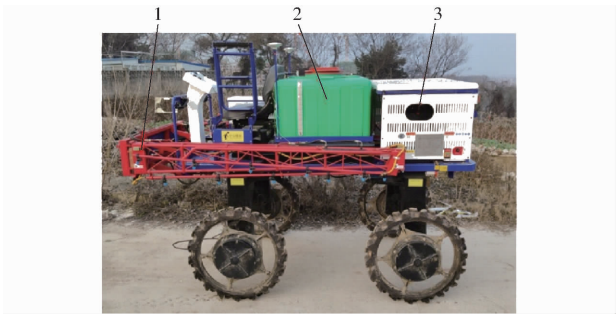


图 4 高地隙喷雾机实物图
Fig. 4 Picture of high clearance sprayer
1. 喷杆 2. 药箱 3. 发电机

自转向机构运行时需要实时调节转向桥两侧电机的输出转矩,设计控制系统之前需建立电机转矩与转向桥、车架之间夹角的动力学模型。自转向机构由 4 个轮毂电机共同驱动,前后转向桥存在强耦合,同时前后转向桥绕点 A、B 作旋转运动,会引入含三角函数的坐标变换,因此也存在着非线性特性。基于此,本文借助于扰动观测技术,建立部分动力学模型,将未建模动态包括耦合作为系统扰动的一部分,和实时外部扰动一并作为总扰动来进行观测,再利用 ESO 具有估计不确定扰动的能力估计总扰动,并采用控制器予以补偿^[20]。

1.2 自转向底盘运动学建模

自转向底盘运动学模型简图如图 5 所示,以底盘几何中心 O 为原点,以纵向为 x 轴,横向为 y 轴建立坐标系 Oxy。θ 表示自转向底盘的角速度。以前转向桥转向中心点 A 为坐标原点,以前转向桥横向为 x_A 轴,纵向为 y_A 轴建立坐标系 Ax_Ay_A;同理建立坐标系 Bx_By_B。定义坐标系 Ax_Ay_A 的 x_A 轴与 Oxy 的

x 轴夹角为前转向桥转角 α;定义坐标系 Bx_By_B 的 x_B 轴与 Oxy 的 x 轴夹角为后转向桥转角 β。

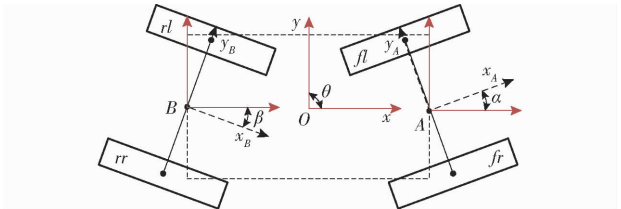


图 5 自转向底盘运动学模型简图
Fig. 5 Kinematics model sketch of self-steering chassis

中间车架的长度为 L(点 A 与点 B 之间的直线距离),前后转向桥的长度为 D(fl 与 fr 或 rl 与 rr 的距离)。点 A 速度为 v_A,前转向桥两侧的轮子 fl、fr 与地面的相对速度为 v_{fl} 和 v_{fr},根据速度之间关系可得

$$v'_{fl} = -\dot{\alpha} \frac{\delta D}{2} \tag{1}$$

$$v'_{fr} = \dot{\alpha} \frac{\delta D}{2} \tag{2}$$

$$v_{fl} = v'_{fl} + v_A \tag{3}$$

$$v_{fr} = v'_{fr} + v_A \tag{4}$$

式中 δ——转换系数,取 π/180
v'_{fl}——左前轮由于前转向桥定轴转动产生的速度
v'_{fr}——右前轮由于前转向桥定轴转动产生的速度

假设车轮和地面不打滑,如图 6 所示。

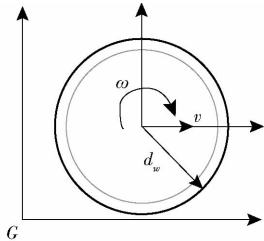


图 6 车轮模型
Fig. 6 Wheel model

可得车轮角速度与速度关系为

$$\omega_i = \frac{v_i}{d_w} \quad (i = fl, fr, rl, rr) \tag{5}$$

式中 ω_i——角速度 v_i——车轮速度
d_w——半径

1.3 转向桥动力学建模

前后转向桥受力分析类似,因此只进行前转向桥的受力分析。如图 7 所示,前转向桥总共受到 5 个力的作用,分别为由左、右 2 个电机输出转矩产生的主动力 F_{fl}、F_{fr},地面摩擦力 f_{fl}、f_{fr} 以及车架对前转向桥的作用力 F_A。主动力 F_{fl} 与 F_{fr} 由电机产生,模取取决于电机的输入电压与车轮转速,方向则为车轮的纵向;地面摩擦力 f_{fl}、f_{fr} 和车架对前转向桥作用

力 F_A 的模以及方向均取决于底盘的运动状态,与车速、方向和路面情况等诸多因素相关,其模和方向均不固定。

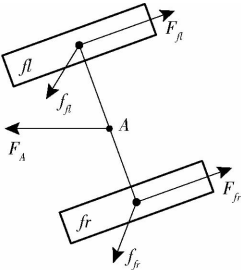


图 7 前转向桥动力学模型
Fig. 7 Dynamic model of forward steering axle

在底盘转向控制上需分析各力对点 A 的矩,即前转向桥受到的主矩。力 F_A 作用于点 A ,力臂为 0 ,因此不产生转矩;电机输出的力 F_{fl} 、 F_{fr} 对转角 α 的影响最大,依据本文的建模思想,首先建立部分动力学模型,然后将未建模部分作为扰动进行实时估计。因此在建模时将模型简化为只存在力 F_{fl} 和 F_{fr} ,其他的力一律作为扰动。

令 $F_{fl} = |F_{fl}|$, $F_{fr} = |F_{fr}|$,可得前转向桥受到的主矩为

$$T_F = F_{fr} \frac{D}{2} - F_{fl} \frac{D}{2} = \frac{D(F_{fr} - F_{fl})}{2} \tag{6}$$

式中 T_F ——前转向桥受到的主矩

根据欧拉方程可得

$$J_F \delta \ddot{\alpha} = T_F \tag{7}$$

$$J_F \delta \ddot{\alpha} = \frac{D(F_{fr} - F_{fl})}{2} \tag{8}$$

式中 J_F ——前转向桥的转动惯量

利用直流电机的动力学方程可得

$$F_i = \frac{T_i - J_{wi} \dot{\omega}_i - f_{wi} \omega_i}{d_w} \quad (i = fl, fr, rl, rr) \tag{9}$$

式中 F_i ——车轮输出的力

J_{wi} ——车轮转动惯量

f_{wi} ——车轮轴摩擦因数

T_i ——电机输出转矩

直流电机转矩与输入电压的关系为

$$T = k_t \frac{U - k_e \omega}{R} \tag{10}$$

式中 k_t ——电枢常数

U ——直流电机输入电压

k_e ——反电势常数

R ——电机内阻

将式(9)代入式(6),可得

$$T_F = \frac{D(T_{fr} - J_{wfr} \dot{\omega}_{fr} - f_{wfr} \omega_{fr} - T_{fl} + J_{wfl} \dot{\omega}_{fl} + f_{wfl} \omega_{fl})}{2d_w} \tag{11}$$

转向桥两侧电机以及车轮制作工艺相同,参数相近,因此模型中可认为相等,即 $J_{wfr} = J_{wfl} = J_w$, $f_{wfr} = f_{wfl} = f_w$,并且将式(10)与式(7)代入式(11)可得

$$J_F \delta \ddot{\alpha} = \frac{D}{2Rd_w} (k_t U_F + R J_w \dot{\omega}_F + M \omega_F) \tag{12}$$

其中 $U_F = U_{fr} - U_{fl} \quad \omega_F = \omega_{fl} - \omega_{fr}$

$$\dot{\omega}_F = \dot{\omega}_{fl} - \dot{\omega}_{fr} \quad M = R f_w + k_t k_e$$

将式(5)代入式(12),可得

$$\ddot{\alpha} = \frac{D}{2Rd_w J_F \delta} \left(k_t U_F + \frac{R J_w}{d_w} \dot{v}_F + \frac{M}{d_w} v_F \right) \tag{13}$$

其中 $\dot{v}_F = \dot{v}_{fl} - \dot{v}_{fr} \quad v_F = v_{fl} - v_{fr}$

又由式(1)~(4)可得

$$v_{fl} - v_{fr} = v'_{fl} - v'_{fr} = -\dot{\alpha} \delta D \tag{14}$$

$$\dot{v}_{fl} - \dot{v}_{fr} = \dot{v}'_{fl} - \dot{v}'_{fr} = -\ddot{\alpha} \delta D \tag{15}$$

对式(13)~(15)进一步整理可得

$$\ddot{\alpha} + C_2 \dot{\alpha} = C_1 U_F \tag{16}$$

其中 $C_1 = \frac{d_w k_t D}{\delta (2R d_w^2 J_F + R J_w D^2)}$ (17)

$$C_2 = \frac{M D^2}{2R d_w^2 J_F + R J_w D^2} \tag{18}$$

同理也可获取后转向桥的动力学模型为

$$\ddot{\beta} + C_4 \dot{\beta} = C_3 U_R \tag{19}$$

其中 $U_R = U_{rr} - U_{rl}$

前后转向桥结构一致,材料和制作工艺相同,故前后转向桥的转动惯量近似相等,则可以认为 $C_3 = C_1, C_4 = C_2$ 。

2 控制系统设计

2.1 扩张观测器设计

ESO 是一种特殊的状态观测器^[21],其基本原理是依据系统的微分方程,利用可测量输出对系统中的不可测量状态进行重构,其核心思想是将扰动作为系统的扩张状态,再利用特殊反馈机制估计出系统的扩张状态^[22-23]。由此可知,首先需要将本系统转换为状态空间描述形式,即

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \tag{20}$$

式(16)为前转向桥动力学模型。于是令 $x_1 = \alpha, x_2 = \dot{\alpha}$,将式(16)转换为状态空间描述,即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 \end{bmatrix} U_F \\ y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{21}$$

式(21)与式(20)进行对比后可以得到 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}$, $u = U_F$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -C_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ C_1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = [1 \ 0]$, $\mathbf{D} = [0]$ 。本系统在建模时忽略了摩擦力以及车架对前转向桥的作用力,令此未建模扰动为 $d_1(\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha})$,再令外部扰动为 $d_2(t)$,则系统的总扰动 $h = d_1 + d_2$,结合式(20),得到考虑扰动项的系统状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(u + h) \quad (22)$$

式(22)中,将总扰动直接等效到系统输入端,通过估计得出的总扰动 h 与输入 u 单位相同。由于总扰动的模型未知,文献[24]提出其模型为 $\dot{h} = 0$ 。将 h 作为扩张状态,则式(22)进行变换后得到

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (23)$$

如式(23)所示,此时二阶系统被扩张为三阶,设计三阶 ESO^[25] 估计系统状态为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - l_1 e \\ \dot{z}_2 = -C_2 z_2 + C_1 z_3 + C_1 u - l_2 e \\ \dot{z}_3 = -l_3 g(e) \end{cases} \quad (24)$$

式中 e ——角度偏差

z_1 ——转角 x_1 的估计量

z_2 ——角速度 x_2 的估计量

z_3 ——总扰动 h 的估计量

l_1, l_2, l_3 ——误差反馈系数

$g(e)$ ——非线性函数

为了尽可能减少参数个数并提高观测器的估计效率,式(24)中对 z_1 和 z_2 的观测采用了线性反馈,对 z_3 的观测采用了非线性函数 $g(e)$ 构造了非线性反馈,其中 $g(e)$ 为 $\text{fal}(e, a, b)$ ^[22],其中 a 和 b 为参数。 fal 函数定义为

$$\text{fal}(e, a, b) = \begin{cases} |e|^a \text{sign}(e) & (|e| > b) \\ e/b^{1-a} & (|e| \leq b) \end{cases} \quad (25)$$

2.2 控制器设计

ESO 不仅估计了系统的总扰动 z_3 ,同时也获得了系统状态变量 α 和 $\dot{\alpha}$ 的估计量 z_1 和 z_2 。采用角度传感器测量 α ,但是直接测量的角度往往带有传感器高频噪声。为了避免再运行一个低通滤波器增加系统负担,直接采用 ESO 输出的 z_1 进行控制系统设计。

在设计 ESO 时,将系统总扰动 h 等效到系统输入端。 h 的估计值 z_3 与 u 单位相同,则将控制律取为

$$u = u_0 - z_3 \quad (26)$$

系统总扰动在系统输出时被补偿。将式(26)代入式(22)可得

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u_0 \quad (27)$$

如式(27)所示,此时系统已为线性系统,并且系统中含有一个积分器,故无需设计积分控制器,于是针对这个系统设计了串级比例控制器。首先对角度误差作第 1 级闭环,然后再将第 1 级闭环的结果作为第 2 级闭环的输入,从而实现两级闭环控制。控制器为

$$\begin{cases} e_0 = \alpha_d - z_1 \\ u_1 = k_0 e_0 \\ u_0 = k_1(u_1 - z_2) \end{cases} \quad (28)$$

式中 α_d ——期望转角

k_0 ——第 1 级闭环参数

k_1 ——第 2 级闭环参数

根据式(12)、(21)、(23)可知控制系统输出 $u = U_F = U_{fr} - U_{fl}$ 。本设计并未进行速度控制,通过开环给定油门,令电压油门信号 m 为

$$m = U_{fr} + U_{fl} \quad (29)$$

其中

$$U_{fr} = \frac{m}{2} + \frac{u}{2} \quad (30)$$

$$U_{fl} = \frac{m}{2} - \frac{u}{2} \quad (31)$$

图 8 为前转向桥控制系统结构图,后转向桥控制系统结构和前转向桥相同,只是期望转角的方向与前转向桥相反。电压油门信号 m 和期望转角 α_d 为系统参考输入,试验时由遥控器给定。在控制系统中,油门信号是开环给定,因此油门也会耦合到转向桥系统,但此耦合最终会被计入到总扰动,依赖 ESO 和控制律予以补偿。

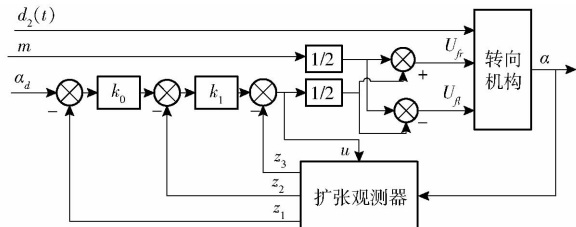


图 8 前转向桥控制系统结构图

Fig. 8 Front axle steering mechanism control system structure diagram

3 仿真与试验

3.1 电动底盘参数辨识

为了验证本文设计控制算法的可行性,首先需辨识出模型参数。由式(16)可知,需要辨识的参数为 C_1 和 C_2 。电动底盘前后转向桥结构一样,理想情况下 $C_1 = C_3$, $C_2 = C_4$,因此只需辨识前转向桥参

数即可。

将电动底盘置于平坦路面,以尽量避免外部干扰影响辨识结果。使用 Jlink - pro 仿真器进行数据采集,并通过 J - Scope 软件显示并保存采集的数据,如图 9 所示,数据采样率为 500 Hz。

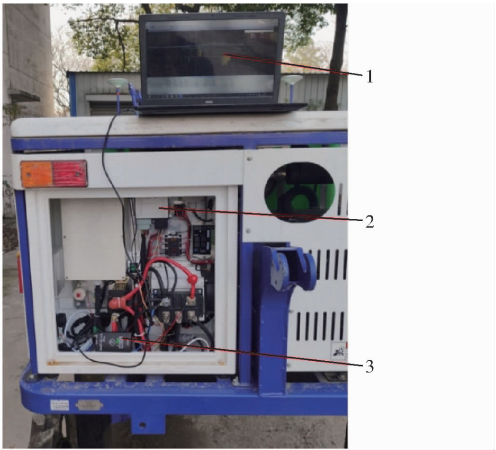


图 9 高地隙喷雾机试验系统

Fig. 9 High ground clearance sprayer test system

1. J - Scope 软件 2. 主控 3. Jlink - pro 仿真器

参数辨识是利用系统的输入输出数据计算出模型参数的方法,因此只需要开环给定前转向桥机构输入 U_F ,再采集输出 α ,便可以辨识得出参数 C_1 、 C_2 。试验需采集 2 组数据,一组数据用于参数辨识,另一组数据用于模型验证。试验得到的 2 组数据如图 10 所示。

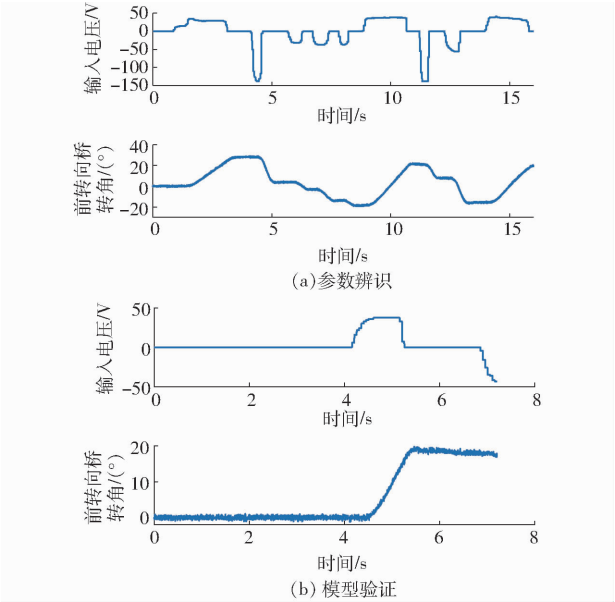


图 10 输入电压与输出转角

Fig. 10 Input voltage and output angle data

模型参数辨识使用 Matlab 系统辨识工具箱,导入待辨识数据,可得辨识结果为: $C_1 = 0.592\ 06$ 、 $C_2 = 2.798\ 38$ 。

图 11 为模型验证结果。可以看出模型输出与

采集的转角数据十分接近,其拟合度为 90.1%,拟合结果较好。

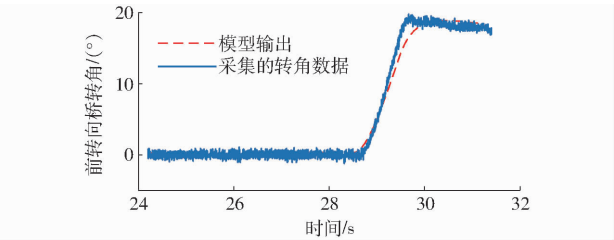


图 11 模型验证结果

Fig. 11 Model validation

3.2 控制器仿真

根据辨识得到的参数,利用 Matlab 脚本构建仿真程序。为尽量逼近真实情况,在采样的转角信号中加入标准差为 0.1 的高斯白噪声。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
l_1	30
l_2	400
l_3	3 000
a	0.5
b	0.7
k_0	13
k_1	0.5

喷雾机在启动时转向角很难保证为 0° ,为了更接近实际情况,在仿真时将模型状态变量转角 x_1 初值设为 10° ,角速度 x_2 初值设置为 $0(^\circ)/s$,ESO 状态变量 z_1 、 z_2 、 z_3 初值均设置为 0,期望转角 α_d 和扰动 h 初值也设置为 0,运行至 4 s 时扰动 h 由 0 突加至 60 V (图 12c),8 s 时期望转角 α_d 由 0° 阶跃至 20° 。控制系统仿真结果如图 12 所示。

在前 4 s 时间内,外部扰动为 0,期望转角为 0° ,系统实际转角初值为 10° ,实际角速度初值为 $0(^\circ)/s$,图 12a、12b 为 ESO 输出的观测转角在 0.3 s 时收敛到实际转角,观测角速度在 0.5 s 时收敛到实际角速度。图 12c 显示扰动观测值在 0.9 s 时收敛到实际扰动。图 12b、12c 显示在开始启动前 0.9 s 内,观测角速度和观测扰动都出现了严重偏离实际值的情况,这是由于 ESO 初始值偏离真实值导致,此时角速度和扰动估计值误差会导致控制器输出异常,严重时会导致系统在启动时振荡,因此启动时先等 ESO 收敛,然后再允许控制器输出。

当系统运行至 4 s 时,外部扰动由 0 突加至 60 V,如图 12c 所示,实际转角受突变扰动影响偏离期望转角 1.9° ,在 0.5 s 后 ESO 扰动观测值即收敛到真

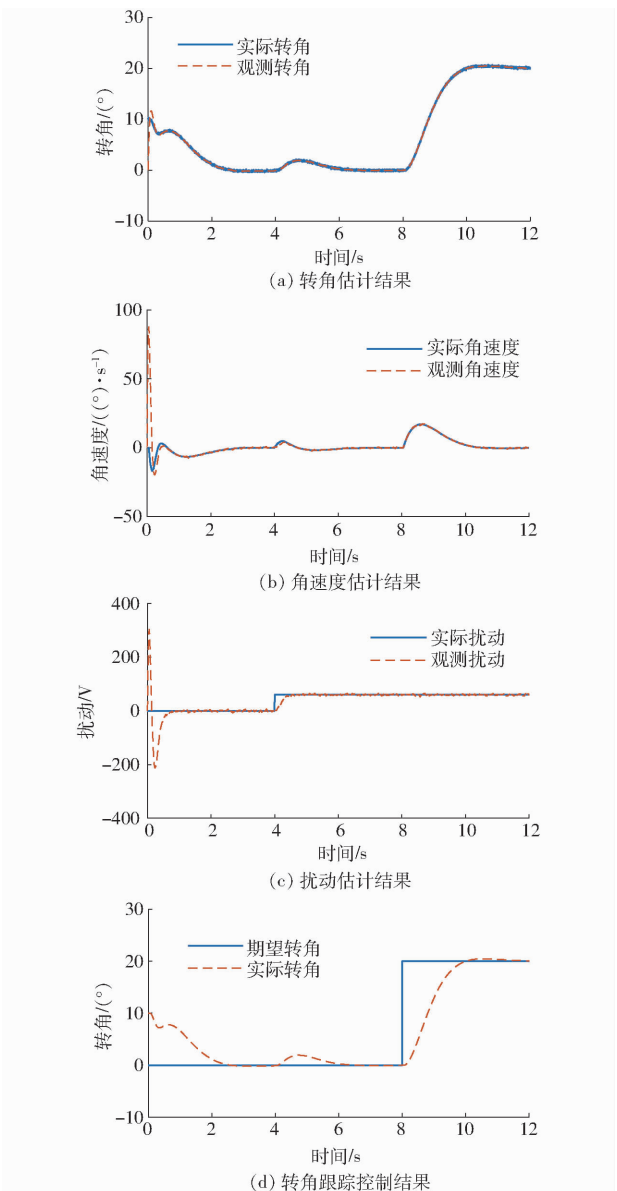


图 12 控制系统仿真结果

Fig. 12 Simulation results of control system

实扰动,实际转角在控制器的作用下也随之收敛到期望转角 0° ,可知本控制系统可以消除未知扰动影响。当系统运行至 8 s 时,期望转角 α_d 由 0° 阶跃至 20° ,如图 12d 所示,转角跟踪控制响应曲线的上升时间为 1.9 s,超调量 2.3%。仿真结果证明了 ESO 的估计性能和控制器的有效性。

3.3 试验验证

为了验证控制器在喷雾机上的工作效果和和田间行走的通过性,分别进行了平坦路面行走试验和在泥泞田间通过性试验。

平坦路面行走试验可以获取控制器的响应情况以测试控制器的性能。使用 Jlink - pro 仿真器采集数据并保存成文本文件,再利用 Matlab 绘图分析;通过遥控器开环给定油门,缓加油门使其速度达到 1 m/s,然后拨动遥控器方向摇杆——给定期望转

角,执行转向动作。试验结果如图 13 所示,可知前转向桥转角上升时间为 3.1 s,后转向桥转角上升时间为 2.0 s;前转向桥转角上升时间大于后转向桥,原因是在运动过程中前转向桥所受到的扰动大于后转向桥。试验结果表明控制器满足控制要求。

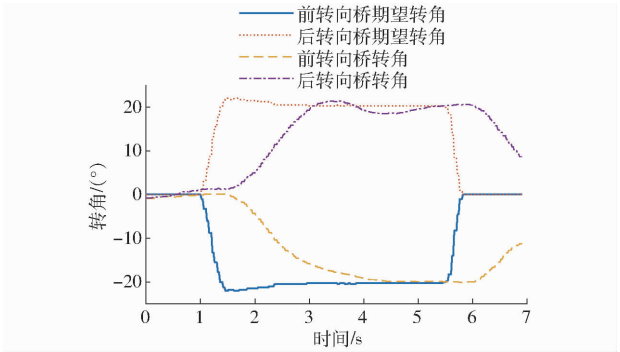


图 13 平坦路面行走试验结果

Fig. 13 Test results

田间通过性试验选择场地为南通广益机电有限责任公司内部试验田,场地采用开沟机开出多条深 40 cm、宽 20 cm 的沟,经过灌水浸泡后场地较为泥泞。田间试验时喷雾机药箱装满 500 L 水,为满载状态,同时发电机为开启状态以提供充足电能。驾驶喷雾机通过泥泞深沟障碍,试验情况如图 14 所示。图 14a 为喷雾机连续横越深沟,在试验中,喷雾机可以轻松越过此类障碍;图 14b 为喷雾机右侧车轮陷入深沟,由于陷入深沟的轮子不断打滑,造成了通过此类障碍时没有横越深沟时轻松,但也可通过。



(a) 喷雾机横越深沟 (b) 右侧轮陷入深沟

图 14 泥泞田间通过性试验

Fig. 14 Mud field through test

4 结论

(1) 针对现有高地隙喷雾机在复杂水田环境中行走,时常会陷在泥泞和深沟中,无法继续工作的问题,设计了一种四轮独立驱动自转向电动底盘,根据底盘自转向机构特点,对转向桥进行建模,设计了 ESO 和控制器,并进行了参数辨识试验,利用 Matlab 辨识了模型参数。

(2) 通过仿真对 ESO 和控制器进行了验证,使用阶跃信号模拟扰动,得到 ESO 的扰动观测值可在 0.5 s 内收敛到实际扰动;在扰动观测器收敛后,期望转角阶跃至 20° ,得到转角响应曲线的上升时间

为 1.9 s,超调量 2.3%。说明 ESO 和控制器可以完成控制任务。

(3)在平坦路面行走试验中,喷雾机速度缓加至 1 m/s,给定期望转角后可得前转向桥转角上升

时间 3.1 s,后转向桥转角上升时间为 2.0 s,与仿真所得结果相近;在田间通过性试验中,喷雾机在满载情况下仍可以越过宽 20 cm、深 40 cm 的水沟,证实其在田间具有良好的通过性。

参 考 文 献

- [1] 李震,何青海,孙宜田,等. 国内外农用喷雾机的发展现状及趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(3): 23–26. LI Zhen, HE Qinghai, SUN Yitian, et al. Development status and trend of agricultural sprayer at home and abroad[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(3): 23–26. (in Chinese)
- [2] 王锦江,聂志光,杨学军,等. 高地隙喷雾机在玉米生产中的应用[J]. 农业工程, 2018, 8(4): 13–17. WANG Jinjiang, NIE Zhiguang, YANG Xuejun, et al. Application of high-clearance sprayer in corn production [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 13–17. (in Chinese)
- [3] 白海超. 水田喷杆喷雾机喷雾装置优化设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019. BAI Haichao. Optimal design and experiment of spray device for paddy field boom sprayer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [4] 陈黎卿,许泽镇,解彬彬,等. 无人驾驶喷雾机电控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 122–128. CHEN Liqing, XU Zezhen, XIE Binbin, et al. Design and test of electronic control system for unmanned drive sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 122–128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.013. (in Chinese)
- [5] 王金武,白海超,孙小博,等. 水田喷雾机喷雾装置设计与动态分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 69–79. WANG Jinwu, BAI Haichao, SUN Xiaobo, et al. Design and dynamic analysis of spray device for paddy field sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 69–79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.007. (in Chinese)
- [6] 武秀恒,秦嘉浩,杜岳峰,等. 高地隙喷雾机主动空气悬架减振控制与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 60–67. WU Xiuheng, QIN Jiahao, DU Yuefeng, et al. Experiments of vibration control for active pneumatic suspension system in high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 60–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.007. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 189–198. ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Suppl.): 189–198. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.025. (in Chinese)
- [8] 马俊,温浩军,侯海啸,等. 高地隙喷杆喷雾机喷架设计及分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 98–102. MA Jun, WEN Haojun, GOU Haixiao, et al. Design and analysis of spray frame for high altitude gap spray rod sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 98–102. (in Chinese)
- [9] 林立恒,侯加林,吴彦强,等. 高地隙喷杆喷雾机研究和发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(2): 38–42. LIN Liheng, HOU Jialin, WU Yanqiang, et al. Review and development trend of high clearance boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(2): 38–42. (in Chinese)
- [10] 张京,陈度,王书茂,等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 63–70. ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Design and experiment of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 63–70. (in Chinese)
- [11] 范国强,张晓辉,王金星,等. 四轮菱形布置农用高地隙作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 84–89. FAN Guoqiang, ZHANG Xiaohui, WANG Jinxing, et al. Design and test of high clearance agricultural machine with four-wheel diamond arrangement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 84–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.012. (in Chinese)
- [12] YE Y, HE L, ZHANG Q. Steering control strategies for a four-wheel-independent-steering bin managing robot[J]. IFAC – PapersOnLine, 2016, 49(16): 39–44.
- [13] 许超,陈永成,李瑞敏,等. 高地隙自走式喷杆喷雾机的设计与研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 51–54. XU Chao, CHEN Yongcheng, LI Ruimin, et al. Design and research on highland gap self-propelled lance spray[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 51–54. (in Chinese)
- [14] 李伟,薛涛,毛恩荣,等. 高地隙自走式喷雾机多轮转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 141–151. LI Wei, XUE Tao, MAO Enrong, et al. Design and experiment of multifunctional steering system for high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 141–151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.015. (in Chinese)

- PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1): 157–165. (in Chinese)
- [18] 齐文超,李彦明,张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17–23.
- QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17–23. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.002. (in Chinese)
- [19] 齐文超,李彦明,陶建峰,等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 381–388.
- QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 381–388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)
- [20] 刘平义,王春燕,李海涛,等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 74–81.
- LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 74–81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180210&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.010. (in Chinese)
- [21] 徐立章,荆博,李耀明. 联合收获机可升降履带式底盘: CN208191398U[P]. 2018–12–07.
- [22] JING Bo, XU Lizhang. Design and simulation of liftable crawler chassis for combine harvester[J]. Journal of Advances in Agriculture, 2018, 8(1): 1476–1487.
- [23] 杨宇静. 重型平板车自动调平控制系统的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2015.
- YANG Yujing. Research of leveling control system of heavy duty flat vehicle[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015. (in Chinese)
- [24] 廖汉元,孔建益,李佳. 平面两自由度铰链五杆机构的类型及判别[J]. 湖北工业大学学报, 2006(3): 4–6.
- LIAO Hanyuan, KONG Jianyi, LI Jia. The types of 5-bar linkage with two-degree of freedom and their differentiation[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2006(3): 4–6. (in Chinese)
- [25] 雷经发,扈静,魏涛. 基于 MATLAB 的平面四杆机构运动学分析[J]. 机械工程师, 2009(9): 76–78.
- LEI Jingfa, HU Jing, WEI Tao. Kinematic analysis of the planar four bar linkage mechanism based on MATLAB[J]. Mechanical Engineer, 2009(9): 76–78. (in Chinese)

(上接第 392 页)

- [15] 刘志刚,李瑞川,李政平,等. 自走式喷雾机底盘液压传动系统设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(4): 72–75.
- LIU Zhigang, LI Ruichuan, LI Zhengping, et al. Design of hydraulic transmission system for self-propelled sprayer's chassis[J]. Machine Tool & Hydraulic, 2019, 47(4): 72–75. (in Chinese)
- [16] 张国远. 高地隙自走式平台四轮转向系统的研究和设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- ZHANG Guoyuan. Research and design of four wheel steering system of high clearance self-propelled platform[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [17] 马帅超. 四轮高地隙田间作业车独立转向系统的设计与研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2018.
- MA Shuaichao. Design and research of independent steering system for four wheel high clearance operation vehicle[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [18] 曾山,刘竣,罗锡文,等. 水田高地隙喷雾机轮履复合动力底盘的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 14–22.
- ZENG Shan, LIU Jun, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of wheel-track compound power chassis for high clearance sprayer in paddy field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 14–22. (in Chinese)
- [19] 李泽,石毅新,蒋蕻,等. 高地隙通用作业底盘的设计与试验[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 100–105.
- LI Ze, SHI Yixin, JIANG Pin, et al. Design and experimental research of high clearance universal operation chassis[J]. Food & Machinery, 2018, 34(2): 100–105. (in Chinese)
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [21] OGATA K. Modern control engineering[M]. 5th ed. Boston: Prentice-Hall, 2010.
- [22] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900–906.
- [23] SU Y X, ZHENG C H, DUAN B Y. Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 814–823.
- [24] MADONSKI R, GAO Z, LAKOMY K. Towards a turnkey solution of industrial control under the active disturbance rejection paradigm[C]//2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). Hangzhou, China: IEEE, 2015: 616–621.
- [25] LIJUN W, CHAONAN T, YIXIN Y, et al. Active disturbance rejection controller for monitor AGC system with large time delay[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference (CCC). Beijing, China: IEEE, 2010.