DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.02.003

4WID高地隙自走式电动喷雾机定速巡航控制方法

胡宸玮，陈雨*，曹佳宇，陈宇翔，张硕，陈军

（西北农林科技大学机械与电子工程学院，陕西杨凌，712100）

摘要：针对4WID高地隙自走式电动喷雾机在复杂工况下，面对来自外部道路坡度改变及内部药液喷洒带来整备质量下降，从而导致喷雾机行驶速度稳定性差、作业质量恶化等问题，在分析4WID高地隙自走式电动喷雾机结构与纵向动力学特性基础上，设计一种定速巡航分层控制算法。控制算法模型接收用户设定的期望行驶车速，经过算法计算后对纵向动力学系统模型输入加速度控制信号，实现喷雾机对期望车速的跟踪。搭建的纵向动力学系统结构主要包括5个部分：逆纵向动力学模型、加速与制动切换模型、转矩分配模型、电机模型和纵向动力学模型。通过对斜坡行驶状态下喷雾机的车身状态进行受力分析可获得其逆纵向动力学及纵向动力学模型；同时，为建立合理的四轮转矩分配策略，在喷雾机车身同时具有俯仰及侧倾的条件下进行分析，以各驱动轮的附着率作为分配依据，满足不同工况下各车轮的最佳驱动力矩，确保喷雾机动力的均衡性。模型定速巡航控制采用分层控制方法，通过建立上层PID控制及下层的模糊PID控制实现对喷雾机车速的有效跟踪，通过制定模糊控制规则，自动对下层控制器的PID参数进行整定，保证在各种复杂工况下喷雾机定速巡航系统的良好适应性。应用Matlab/Simulink建立控制模型，对控制系统进行仿真分析。试验结果表明，在典型工况下，设计的定速巡航控制系统能够有效地对喷雾机的速度进行控制。具体而言，在系统输入外部干扰及自重变化条件下，该控制系统的表现良好，超调量在2%以内，响应时间小于0.2 s，稳态误差趋于0，验证了所采用控制算法的准确性。

关键词：自走式电动喷雾机；定速巡航系统；四轮独立驱动；纵向动力学模型；模糊PID控制

中图分类号：S224.3 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2024）02-0019-14

胡宸玮，陈雨，曹佳宇，陈宇翔，张硕，陈军. 4WID高地隙自走式电动喷雾机定速巡航控制方法[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(2)：19－32

HU Chenwei，CHEN Yu，CAO Jiayu，CHEN Yuxiang，ZHANG Shuo，CHEN Jun. Research on constant speed cruise control of 4WID high ground clearance self-propelled electric sprayer [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024，5(2)：19－32

0 引言

随着农业环保要求愈发严格，以纯电驱动的高地隙自走式喷雾机将成为未来趋势。但由于喷雾机作业工况复杂，外部道路环境改变及内部药液喷洒带来整备质量下降，均易导致喷雾机行驶速度稳定性差、喷雾均匀性差、作业质量恶化等问题，实现复杂环境激扰下的喷雾机定速巡航控制是提高其作业质量与效率的重要手段。当前，国内外学者对农机自动驾驶的研究主要集中在导航路径跟踪控制、导航定位算法等方面，相比于汽车的速度自适应巡航控制研究，农机的定速巡航控制仍有较大的研究空间和发展潜力[1-8]。其中农机方面大多针对以发动机为动力来源的农业机械，结合参数对动力系统进行自动调节，从而达到精准的作业速度[9-10]。针对农机速度控制，COEN等[11]基于收割机的动力学模型设计预测控制器开发巡航控制系统，在不损失加速性能的情况下将发动机转速降至最低。KAYACAN等[12]在设计农用车时，通过PID控制器来控制拖拉机的纵向速度。苗中华等[13]提出基于模糊PID控制的采棉机作业速度实时调整算法，建立速度调节模型，实现采棉机作业速度最优控制。何杰等[14]设计了插秧机专家PID速度控制算法和PID插值机构控制算法及联合控制策略，实现插植作业和速度的自动控制。综上所述，目前对于电动喷雾机这种作业环境复杂且需面对斜坡上作业的情况研究较少，本文针对高地隙自走式电动喷雾机的作业条件和需求，开展定速巡航控制策略研究，实现其工作过程的速度稳定控制。

收稿日期：2023-10-22 修回日期：2024-01-04

基金项目：国家自然科学基金项目(32001428)；国家重点研发计划项目(2022YFD1900304)；陕西省重点研发计划项目(2022NY-205)

第一作者：胡宸玮，男，1997年生，四川成都人，硕士研究生；研究方向为智能农业装备设计与控制。E-mail：2021050993@nwafu.edu.cn

*通信作者：陈雨，男，1989年生，河南南阳人，博士，副教授；研究方向为智能农业装备设计与控制。E-mail：jdxy73@nwafu.edu.cn

1 喷雾机纵向动力学系统建模研究

本文以团队所设计的高地隙自走式电动喷雾机为对象建立相应的纵向动力学模型,在喷雾机的纵向动力总成的理论基础上,为同时满足喷雾机定速巡航系统对于纵向动力学模型的准确性以及简洁性的要求,对系统中各部分进行机理分析,建立喷雾机纵向动力学模型,并通过 Simulink 进行仿真,通过仿真结果验证模型正确性,方便后续控制算法在模型上的控制应用。

1.1 坐标系建立及模型简化假设

根据喷雾机在坡面行驶时的纵向受力及运动状态,建立图 1 所示的空间坐标系下受力示意图。空间坐标系即地面坐标系为 X_S-Y_S-Z_S,X_S、Y_S、Z_S的方向符合右手定则,坐标原点 O_S固定在坡面一角。

跟随喷雾机簧载质量质心移动的坐标系为 X_V-Y_V-Z_V坐标系,该坐标系亦符合右手定则;其原点 O_V与喷雾机簧载质量质心重合,喷雾机在斜坡上行驶时,沿 X_V轴负方向为其纵向运动方向,Y_V为喷雾机横向方向,Z_V为其垂向方向,Z_V与地面坐标系 Z_S方向同向,垂直于地面向上的方向均为正方向。

坡面角度为斜坡在空间坐标系 X_S-Y_S-Z_S中 Y_S-O_S-Z_S平面的投影与 Y_S轴夹角,喷雾机在坡面行驶的航向角为 θ,θ为质心行驶速度与空间坐标系 Y_S-O_S-Z_S平面夹角,喷雾机在空间坐标系下的车身侧倾角为 α,俯仰角为 β。

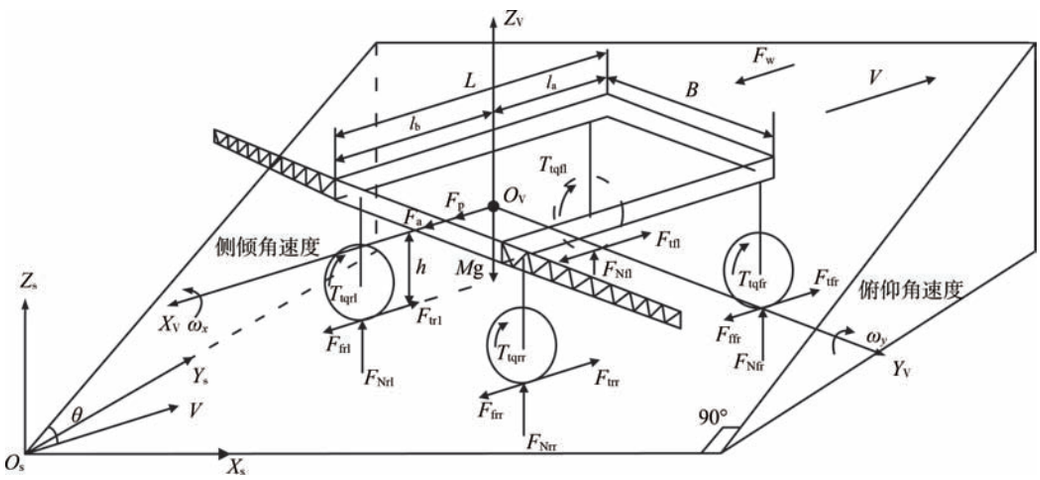


图 1 喷雾机在空间坐标系下受力示意图

Figure 1 Force diagram of the sprayer in spatial coordinate system

图 1 中,M为喷雾机整备质量,L为喷雾机轴距,l_a为喷雾机前轴至质心的距离,l_b为喷雾机后轴到质心的距离,B为轮距,h为质心距坡面高度。在建立喷雾机纵向动力学模型时,做出如下假设:

1)忽略轮胎和地面的变形;

2)轮胎与路面的附着力为理想附着力,轮胎无侧滑与滑移并处于纯滚动状态;

3)仅考虑喷雾机的纵向运动,不考虑横向和垂向运动且忽略横向、纵向运动之间的耦合作用;

4)喷雾机左右完全对称,忽略喷雾机的轮胎滑移。

基于以上假设,本文考虑喷雾机行驶在斜面工况时,车身同时具有俯仰、侧倾情况下建立纵向动力学模型。

1.2 喷雾机定速巡航动力学系统模型结构

为分析电动自走式喷雾机纵向动力学特性,建立电动喷雾机纵向动力学仿真系统,该动力学系统结构主要包括 5 个部分:逆纵向动力学模型、加速与制动切换模型、转矩分配模型、电机模型和纵向动力学模型,如图 2 所示。

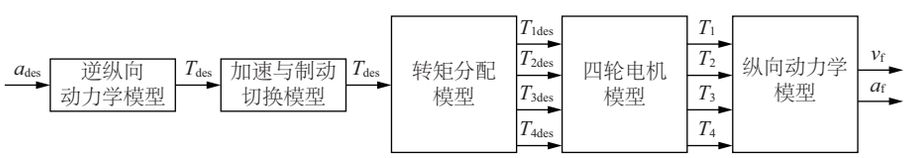


图 2 喷雾机纵向动力学仿真系统

Figure 2 Longitudinal dynamics simulation system of the sprayer

图 2 中,a_{des}为模型期望加速度,T_{des}为期望驱动或制动总转矩,T_{1des}、T_{2des}、T_{3des}、T_{4des}为各车轮期望转矩,T_1、T_2、T_3、T_4为各车轮实际输出转矩,v_f和 a_f分别为喷雾机实际速度和实际加速度。

1.3　喷雾机逆纵向动力学建模

1.3.1　喷雾机行驶阻力分析

根据牛顿第二定律，可以得到喷雾机动力学方程

$$F_t - F_b = F_w + F_a + F_p + F_f \tag{1}$$

式中：F_t——喷雾机总驱动力；

F_b——制动力；

F_w——空气阻力；

F_a——加速阻力；

F_p——坡道阻力；

F_f——滚动阻力。

喷雾机在工作过程中，由于其本身车体较高且喷杆展开后幅宽较大，迎风面积相比普通车辆更大，同时为确保模型搭建的真实性，有必要考虑空气阻力，受到的空气阻力

$$F_w = \frac{1}{2} C_D A \rho V_r^2 = \frac{C_D A V^2}{21.15} \tag{2}$$

式中：C_D——空气阻力系数；

A——喷雾机迎风面积；

V_r——相对速度，$V_r = V + V_{wind}$，考虑无风条件下的喷雾机行驶情况，即此时相对速度为喷雾机行驶车速。

喷雾机在加速行驶过程中的加速阻力

$$F_a = \delta M V' \tag{3}$$

式中：δ——质量换算系数，$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2^2$，$\delta_1 \approx \delta_2 =$ 0.03～0.05；

V'——喷雾机行驶加速度。

喷雾机所受的坡度阻力

$$F_p = Mg \sin\beta \cos\theta \tag{4}$$

喷雾机在行驶过程中受到的滚动阻力

$$F_f = \mu F_N \tag{5}$$

$$F_N = Mg \cos\alpha \cos\beta \tag{6}$$

式中：μ——滚动阻力系数；

α——车身侧倾角；

β——车身俯仰角。

1.3.2　驱动系统动力学模型

喷雾机定速续航过程中，若系统切换为驱动模式，由下层控制器输出的喷雾机加速度控制值计算出喷雾机行驶所需的期望驱动电机转矩，通过对驱动电机转矩进行控制，使得喷雾机跟随期望加速度加速行驶。由喷雾机行驶方程式可推导得喷雾机在加速过程中的纵向运动方程式如式(7)所示。

$$MV' = F_t - F_b - F_w - F_a - F_p - F_f \tag{7}$$

喷雾机整车总驱动力分别由4个轮毂电机提供的驱动力组成。

$$F_t = F_{tf} + F_{tr} \tag{8}$$

$$F_{tf} = F_{tfl} + F_{tfr} \tag{9}$$

$$F_{tr} = F_{trl} + F_{trr} \tag{10}$$

式中：F_{tf}——喷雾机前轴驱动力之和；

F_{tr}——喷雾机后轴驱动力之和；

F_{tij}——各车轮单独驱动力，$(i=f,r;j=l,r)$。

轮毂电机在各车轮上的作用转矩 T_{tqij} 会产生对地的圆周力 F_0，地对轮的反作用力 F_{tij} 即为各车轮的驱动力，表示为

$$F_{tij} = \frac{T_{tqij}\eta_t}{R} \tag{11}$$

式中：T_{tqij}——各车轮对应轮毂驱动电机的输出扭矩，$(i=f,r;j=l,r)$；

R——车轮滚动半径；

η_t——轮毂电机传递效率。

将式(7)—式(11)联立求解可得4个轮毂电机输出转矩之和

$$T_{tq} = \frac{R}{i_g \eta_t} \left\{ \frac{C_D A V^2}{21.15} + M \left[V'(1+\delta) + g \sin\beta \cos\theta + \mu g \cos\alpha \cos\beta \right] \right\} \tag{12}$$

其中，电机转矩

$$T_{tq} = T_{tqfl} + T_{tqfr} + T_{tqrl} + T_{tqrr} \tag{13}$$

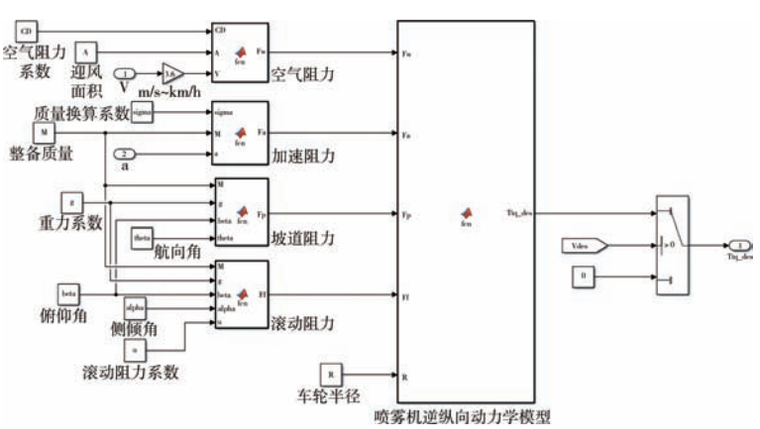


图3　逆纵向动力学模块

Figure 3　Inverse longitudinal dynamics module

将上述所建立各模块数学模型在Simulink中进行搭建,得到图3所示逆纵向动力学模块。

1.4 驱动与制动的切换关系

由于喷雾机工况复杂,其在转场运输或作业期间用户可根据实时路况调整相应合适的车速,故涉及加速、减速的切换关系设置。

当路面状况良好,喷雾机需要提高行驶速度时,用户通过提高期望速度设定值,经上层及下层控制器计算后的期望加速度输入逆纵向动力学模块计算得出轮毂电机相应的加速驱动力矩,经切换模块判断驱动力矩为正值,即将其输出至下一模块执行喷雾机加速操作;若用户面对喷雾机需减速或停止的情况,便可将期望速度降低甚至减至0,此时逆纵向动力学模型根据控制器输入的加速度值计算相应的制动力矩,经切换模块最终向后续模块执行减速操作。根据以上逻辑在Simulink中建立驱动与制动切换关系模块,如图4所示。

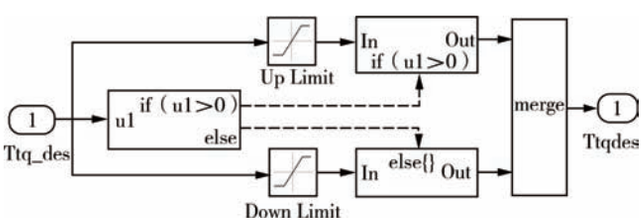


图4 驱动与制动切换关系模块

Figure 4 Drive and brake switching relationship module

1.5 四轮转矩分配策略

为了使喷雾机在斜坡行驶工况下的各车轮驱动转矩得到合理分配,本文将各驱动轮的附着率作为分配依据。当喷雾机正常在坡道行驶时,包括加速、爬坡、高速行驶,忽略旋转质量惯性阻力矩,各轮的附着率

$$\begin{cases} C_{\varphi fl}=\dfrac{F_{tfl}}{F_{Nfl}} \\ C_{\varphi fr}=\dfrac{F_{tfr}}{F_{Nfr}} \\ C_{\varphi rl}=\dfrac{F_{trl}}{F_{Nrl}} \\ C_{\varphi rr}=\dfrac{F_{trr}}{F_{Nrr}} \end{cases} \tag{14}$$

式中:$C_{\varphi fl}$、$C_{\varphi fr}$、$C_{\varphi rl}$、及$C_{\varphi rr}$——左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的附着率;

F_{Nfl}、F_{Nfr}、F_{Nrl}及F_{Nrr}——地面对左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的法向反作用力。

当各驱动轮的驱动力同时达到附着极限时,即$C_{\varphi fl}=C_{\varphi fr}=C_{\varphi rl}=C_{\varphi rr}$时全部附着力均可以转化为喷雾机的驱动力。

由于考虑喷雾机行驶在坡面时同时具有俯仰及侧倾两种车身状态,车身俯仰角和侧倾角会跟随喷雾机行驶方向改变而发生变化,因此在这种工况下地面对于各车轮的法向反作用力不同,各驱动轮驱动力分配的关系可根据地面对于各车轮的法向反作用力不同进而求取,故有

$$F_{tfl}:F_{tfr}:F_{trl}:F_{trr}=F_{Nfl}:F_{Nfr}:F_{Nrl}:F_{Nrr} \tag{15}$$

1.5.1 俯仰视角纵向动力学模型

根据空间中喷雾机的纵向动力学分析可得其从俯仰视角下的纵向动力学受力,即从空间坐标系对其进行分析。此时,喷雾机模型可简化为两轮模型,如图5所示。

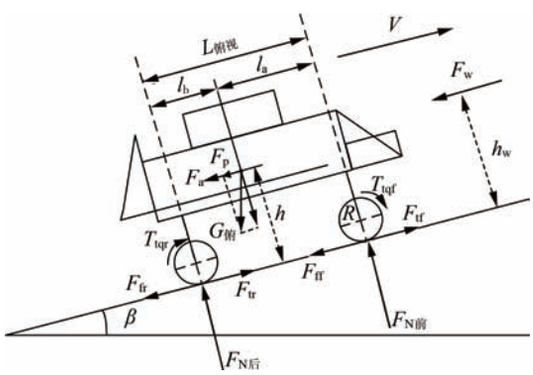


图5 喷雾机俯仰视角下两轮模型

Figure 5 Two-wheel model of the sprayer from a pitch angle view

图5中,β为车身俯仰角,同时由于车身侧倾情况的存在,根据空间中投影关系,喷雾机前后轮中心距离$L_{俯}$、前后轮中心到质心距离$l_{a俯}$、$l_{b俯}$以及重力$G_{俯}$均在该模型中发生改变,其变化如式(16)所示。

$$\begin{cases} L_{俯}=L\cos\alpha \\ l_{a俯}=l_a\cos\alpha \\ l_{b俯}=l_b\cos\alpha \\ G_{俯}=G\cos\alpha \end{cases} \tag{16}$$

式中:α——喷雾机在空间坐标系下的车身侧倾角;

G——空间坐标系下的重力。

对喷雾机后轮与地面的接触点进行受力分析,可得力矩平衡方程

$$F_{N前}L_{俯}+G_{俯}\sin\beta\cdot h=G_{俯}\cos\beta\cdot l_{b俯} \tag{17}$$

式中:$F_{N前}$——地面对喷雾机前轮的法向反作用力;

β——喷雾机俯仰角;

h——在喷雾机坐标系中Z_V方向上质心离坡面直距离。

从而推导出前轮所受的地面法向反作用力

$$F_{N前}=\frac{Mg(l_b\cos\beta\cos\alpha-h\sin\beta)}{L} \tag{18}$$

同理,推导出后轮所受的地面法向反作用力

$$F_{N后}=\frac{Mg(l_a\cos\alpha\cos\beta+h\sin\beta)}{L} \tag{19}$$

1.5.2　侧倾视角纵向动力学模型

根据空间中喷雾机的纵向动力学分析可得喷雾机从侧倾视角下的纵向动力学受力，即从空间坐标系对其进行分析。此时，将喷雾机模型简化为两轮模型，如图6所示。

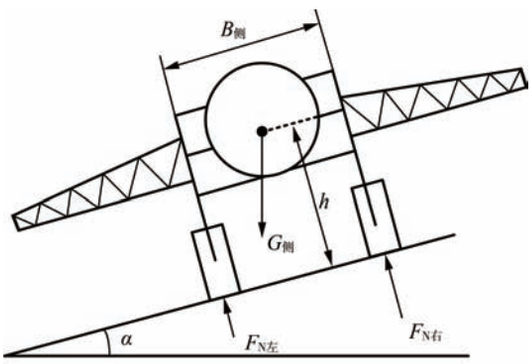


图6　喷雾机侧倾视角下两轮模型

Figure 6　Two-wheel model of the sprayer from a roll angle view

图6中，α为车身侧倾角；同时由于车身俯仰情况的存在，根据空间中投影关系，喷雾机轮距$B_{侧}$以及重力$G_{侧}$在该模型中发生改变，其变化如式(20)所示。

$$\begin{cases}B_{侧}=B\cos\beta\\G_{侧}=G\cos\beta\end{cases} \tag{20}$$

式中：β——喷雾机在空间坐标系下的车身俯视角；

B——空间坐标系下喷雾机轮距；

G——空间坐标系下的重力。

假设喷雾机向里行驶，且由于其左右对称，故左右两侧车轮中心到质心距离相等，均为此时轮距的一半。对喷雾机右侧车轮与地面的接触点进行受力分析，可得力矩平衡方程

$$F_{N左}\cdot B_{侧}=G_{侧}\sin\alpha\cdot h+G_{侧}\cdot\frac{B_{侧}}{2}\cos\alpha \tag{21}$$

式中：$F_{N左}$——地面对喷雾机左侧车轮的法向反作用力。

从而推导出左侧车轮所受的地面法向反作用力

$$F_{N左}=\frac{Mg(h\sin\alpha+\frac{B}{2}\cos\alpha\cos\beta)}{B} \tag{22}$$

同理，从而推导出右侧车轮所受的地面法向反作用力

$$F_{N右}=\frac{Mg(\frac{B}{2}\cos\alpha\cos\beta-h\sin\alpha)}{B} \tag{23}$$

根据喷雾机在空间坐标系下的纵向力学分析，可得

$$\begin{cases}F_{N前}=F_{Nfl}+F_{Nfr}\\F_{N后}=F_{Nrl}+F_{Nrr}\\F_{N左}=F_{Nfl}+F_{Nrl}\\F_{N右}=F_{Nfr}+F_{Nrr}\end{cases} \tag{24}$$

由上述算式可得斜坡地面对整车法向支持力及喷雾机各车轮的转矩分配系数

$$F_N=F_{N前}+F_{N后}=F_{N左}+F_{N右}=Mg\cos\alpha\cos\beta \tag{25}$$

$$\begin{cases}\psi_{fl}=\dfrac{F_{N前}}{F_N}\cdot\dfrac{F_{N左}}{F_N}\\\psi_{fr}=\dfrac{F_{N前}}{F_N}\cdot\dfrac{F_{N右}}{F_N}\\\psi_{rl}=\dfrac{F_{N后}}{F_N}\cdot\dfrac{F_{N左}}{F_N}\\\psi_{rr}=\dfrac{F_{N后}}{F_N}\cdot\dfrac{F_{N右}}{F_N}\end{cases} \tag{26}$$

式中：ψ_{fl}、ψ_{fr}、ψ_{rl}、ψ_{rr}——喷雾机左前轮、右前轮、左后轮和右后轮的转矩分配系数。

根据喷雾机各车轮转矩分配系数可以将整机需求转矩进一步分配至各轮毂电机，以此得到使喷雾机正常行驶的各车轮的最佳动态需求转矩

$$\begin{cases}T_{tqfl}=\psi_{fl}T_{tq}\\T_{tqfr}=\psi_{fr}T_{tq}\\T_{tqrl}=\psi_{rl}T_{tq}\\T_{tqrr}=\psi_{rr}T_{tq}\end{cases} \tag{27}$$

同时由于选取的轮毂电机内部具有减速结构，因此在该转矩分配模型后通过换算得到真实需求转矩输出到后续电机模型中，将上述所建转矩分配数学模型在Simulink中进行搭建如图7所示。

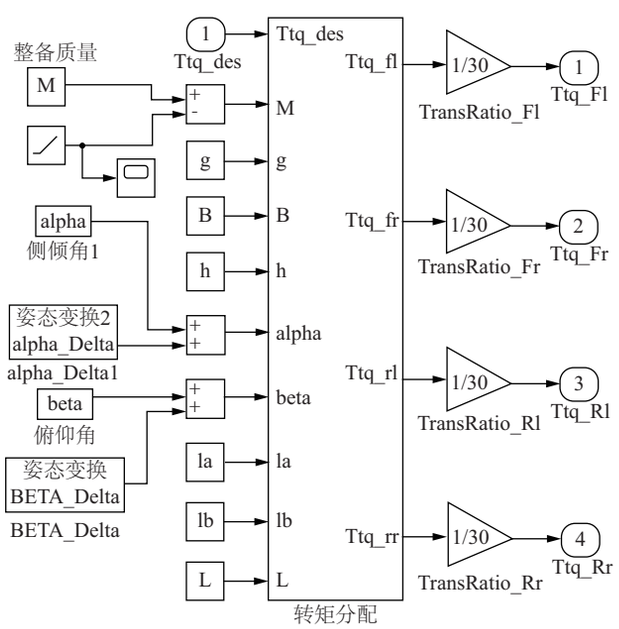


图7　四轮转矩分配策略

Figure 7　Four-wheel torque distribution strategy

1.6 电机模型

在喷雾机逆纵向动力学模型和纵向动力学模型之间,需要驱动电机接收来自逆纵向动力学模型的期望转矩指令,经过电机运转,从而将实际转矩传递到喷雾机纵向动力学模型。本文采用直流无刷电机,在Matlab/Simulink中建立驱动电机模型。在对调速要求高的系统中,首先要求系统能够快速启、制动;其次要求能够快速克服负载、电网等扰动[15]。因此,为最大程度避免扰动对直流电机造成的转速偏差,电机模型搭建过程中采用转速调节器和电流调节器双闭环负反馈及PI调节的方式[16]。基于轮毂电机的实际物理特性,采用Simulink内置电机模型并在模型中进行相关参数设定确保电机模型的建立和实物基本相符,建立了转速外环,电流内环的控制模型以及四个轮毂电机的整体模块,如图8和图9所示。

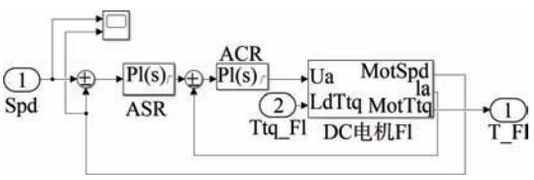


图8 轮毂电机控制模型

Figure 8 Wheel hub motor control model

电机控制模型中,以速度外环作为控制输入,速度外环输出为电流给定值,与实际电流采样做闭环,即为转速电流双闭环。电流闭环输出为调制波信号与三角载波交叠实现PWM功能,输出用于电机控制的直流电压给定值。经过测试,最终确定速度环及电流环调节器参数(见表1)。

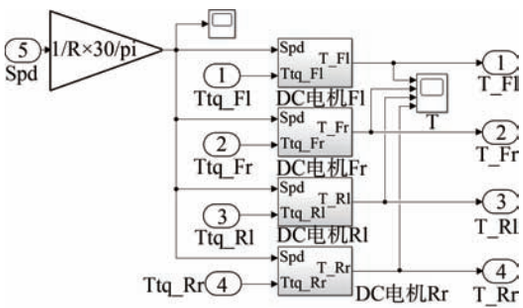


图9 电机整体模块

Figure 9 Overall motor module

表1 电机控制模型调节器参数

Table 1 Motor control model regulator parameters

参数	转速调节器ASR	电流调节器ACR
比例调节系数 k_p	2.5	3.8
积分调节系数 k_i	0.01	0.007

1.7 喷雾机纵向动力学建模

基于前文的行驶阻力及驱动系统动力学模型的数学推导,可对喷雾机的纵向动力学进行建模,见图10。同时,针对喷雾机在作业过程中随着药液喷洒从而整备质量减小以及车身俯仰角以及侧倾角改变的情况,将外部扰动情况加入到模型中,保证动力学模型搭建的真实性与准确性,为后文的控制仿真提供模型保障。

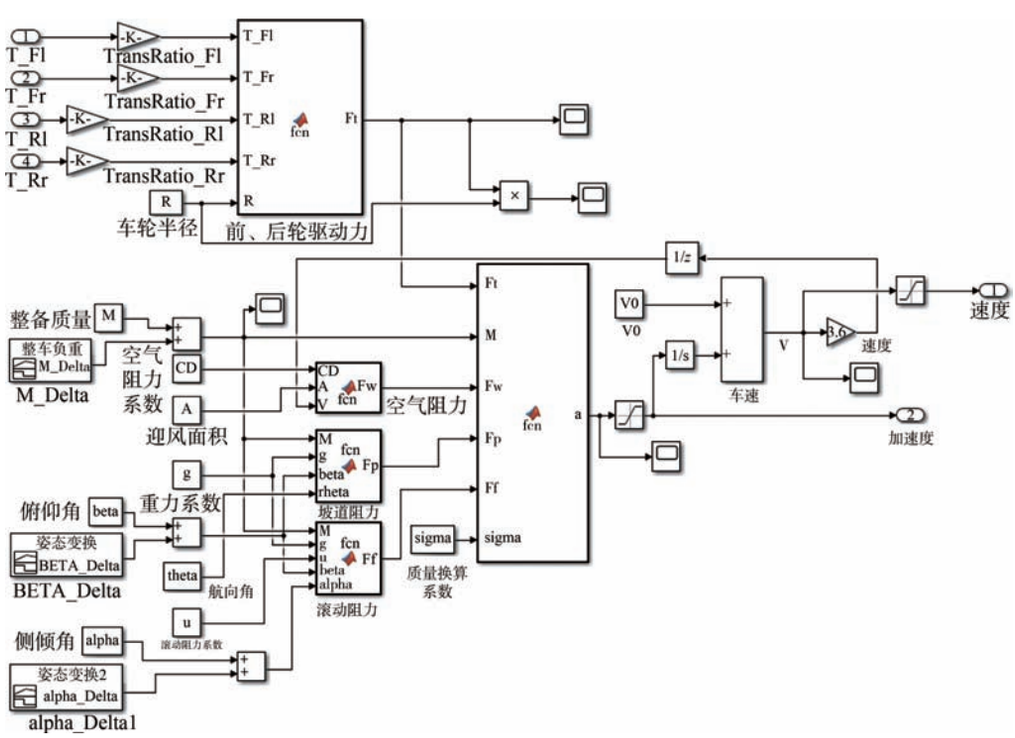


图10 喷雾机纵向动力学模型

Figure 10 Longitudinal dynamics model of the sprayer

1.8　基于Simulink的仿真模型实现

将上述所建立各模块的数学模型，在Simulink上进行实现，按照图2所示的各模块之间联系进行连接。

喷药机的纵向动力学模型在Simulink中的实现如图11所示。

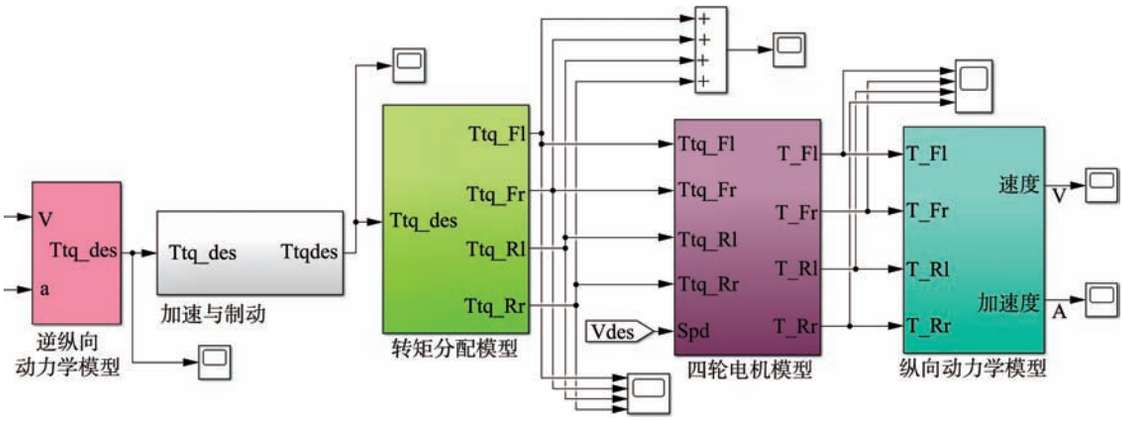


图11　喷药机的定速巡航纵向动力学系统模型仿真框图

Figure 11　Simulation block diagram of the longitudinal dynamics system for the sprayer's cruise control

整个系统的输入为：自重变化、行驶路面坡度、期望速度及加速度，输出为：实际行驶速度和加速度。

2　基于模糊PID的定速巡控制方法设计

定速巡航控制系统的设计，主要是对纵向运动的控制，目前，“纵向控制器”这个术语广泛用于指代控制系统中用于车辆纵向运动控制的控制器，该控制器用于对速度、加速度的控制或者与前车保持距离的控制[3]。控制器的设计目标是安全、准确和高效。“安全”则要求喷雾机加速度及其变化率都尽可能低来保证车辆在速度变化过程中的平稳性，“准确”“高效”目标则期望喷雾机加速度能及时准确响应工况的变化。

2.1　自走式喷雾机定速巡航控制系统的总体设计

配有标准定速巡航功能的农机设备，当用户设定一个速度值时，车辆会跟随设定速度行走，巡航控制系统自动的调节电机输出转矩和制动转矩使得车速维持在设定值。本文将纵向控制系统设计为上下分层结构，一个上层控制器和一个下层控制器，如图12所示。

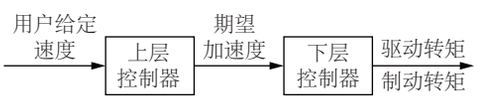


图12　标准定速巡航控制结构

Figure 12　Standard cruise control structure

上层控制器决定了喷雾机的期望加速度，下层控制器决定了电机驱动转矩和制动转矩从而跟踪期望的加速度。前文所建立的整车逆纵向动力学模型、纵向动力学模型、驱动与制动切换模型、电机模型、转矩分配模型通过下层控制器的给定信号实时计算驱动电机输出转矩以跟踪期望加速度，最终保持速度恒定。基于前文建立的纵向动力学系统仿真平台，作为定速巡航控制系统的研究基础，图13为喷雾机定速控制系统的总体方案。

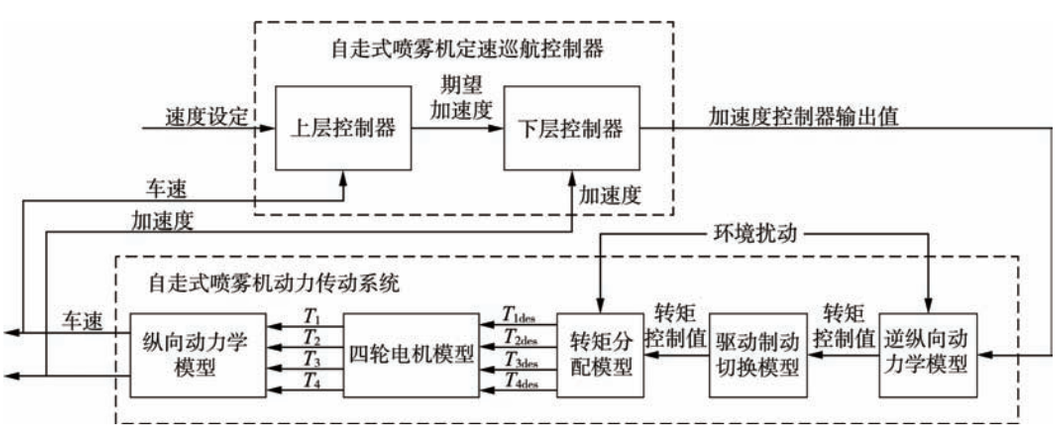


图13　喷雾机定速控制系统的总体方案

Figure 13　Overall scheme of the cruise control system for the sprayer

2.2 上层控制器的设计

上层控制器输入用户的速度设定值和实时车速,向下层控制器输出期望加速度保持喷雾机匀速行驶,其控制功能要求相对简单,采用PID控制算法,保证其快速响应。车速传感器和用户设定值的偏差

$$e_v(t)=v_{des}(t)-v(t) \tag{28}$$

因此,基于PID控制算法,所设计的上层控制器可表示为

$$u(t)=\dot{v}_{des}=k_p e_v(t)+k_i\int_{t_1}^{t_2} e_v(t)\mathrm{d}t+k_d\dot{e}_v(t) \tag{29}$$

式中:$u(t)$——期望加速度,即上层控制器输出信号;

t_1、t_2——仿真时间。

由于喷雾机整备质量较大、质心较高,因此应首先确保加速和减速过程中的车辆安全及稳定性,在上层控制器设计中对加速度的输出大小进行限制,一般农业装备在作业过程中加速度的变化不超过1.5 m/s²。因此,将上层控制器输出的期望加速限定在−1.5~1.5 m/s²之间,表示为

$$\dot{v}_{des}=\begin{cases}1.5\ \mathrm{m/s^2}, (\dot{v}_{des}\geqslant 1.5\ \mathrm{m/s^2})\\ \dot{v}_{des}, (-1.5\ \mathrm{m/s^2}\leqslant\dot{v}_{des}\leqslant 1.5\ \mathrm{m/s^2})\\ -1.5\ \mathrm{m/s^2}, (\dot{v}_{des}\leqslant -1.5\ \mathrm{m/s^2})\end{cases} \tag{30}$$

将上层控制器在Simulink中进行搭建,如图14所示。首先设定k_p初值为2,k_i及k_d均设初值为0,观察输出的相应特性,为保证系统灵敏度较好不断调整k_p,同时为减小系统超调量调整k_i。经多次调试后确定其最佳PID参数组合k_p为15,k_i为3.97,k_d为0。

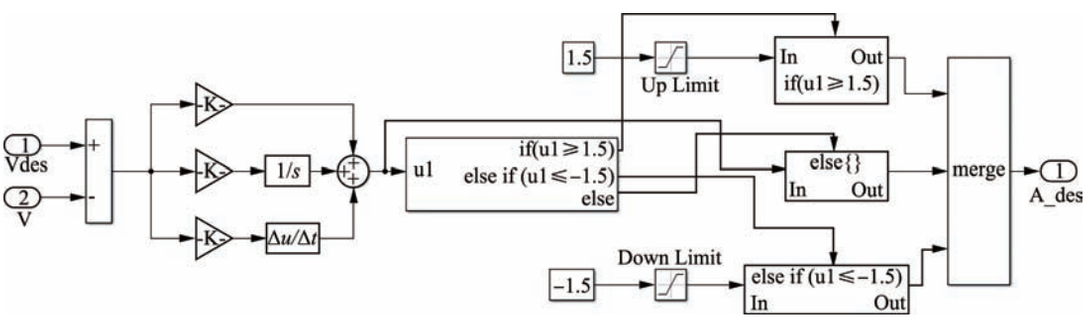


图14 上层控制器模型

Figure 14 Upper-level controller model

2.3 下层控制器的设计

本文综合考虑喷雾机行车时的复杂工况,在确保行驶安全性和平顺性的前提下兼顾控制的准确性,采用模糊PID控制方法作为下层控制器对喷雾机定速巡航进行研究。

常规PID控制参数在调整不适当时会使控制系统振荡,工作状态不稳定,控制效果表现不佳,难以实现有效控制[17-20]。在此基础上本文通过模糊控制结合传统车辆驾驶员的丰富驾驶经验与所研究喷雾机的实际作业情况从而合理设计模糊规则,可对PID控制参数进行整定,保证在各种复杂工况下喷雾机定速巡航系统的良好适应性。

2.3.1 模糊PID控制原理

模糊PID控制的基本原理,即是运用模糊数学的理论和方法制定模糊控制规则,并将这些规则、控制效果评价指标、PID控制初始参数存入计算机知识库,计算机根据控制系统实际响应情况,自动调整PID控制的参数以使得控制效果达到最佳。模糊PID控制原理如图15所示[21]。

在模糊控制器中,输入量先进行模糊化,输入到模糊规则库中,通过模糊规则的推理,输出模糊量K_p、K_i、K_d,经过重心法反模糊化输出精确量k_p、k_i、k_d到PID控制器对输入量进行PID控制,输出控制量控制被控对象。

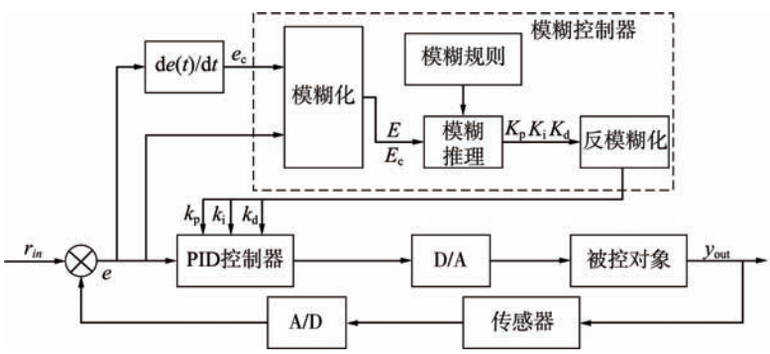


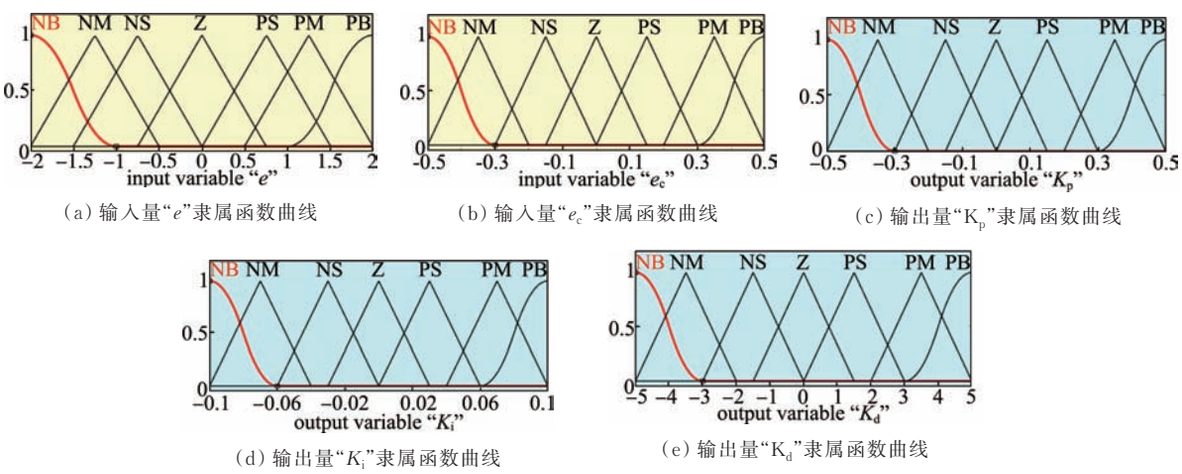
图15 模糊PID控制结构图

Figure 15 Fuzzy PID control structure

2.3.2　模糊PID算法设计

设目标加速度与实际加速度的误差为e，误差变化率为e_c，K_p、K_i、K_d分别为比例、积分、微分系数的模糊值。根据当前自走式喷雾机行驶情况分析，确定目标加速度与实际加速度的误差e的基本论域为[－2，2]，误差变化率e_c论域为[－0.5，0.5]。将变量K_p、K_i、K_d、e_c、e均分成7个模糊集：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。

确定模糊集和论域后，对模糊变量确定隶属函数，即对模糊变量赋值，确定论域内元素对模糊变量的隶属度。因语言值的隶属函数可用离散域上的表格形式表示，也可用连续域上的解析表达式表示，所以这种模糊化方法相当于一个对应的查表或是函数计算过程。建立的输入输出模糊变量的隶属函数曲线如图16所示，其中，NB和PB采用zmf和smf隶属函数，其他均采用trimf隶属函数，隶属度函数中间范围较窄，两边较宽，以使误差较小时快速稳定。



(a) 输入量"e"隶属函数曲线　(b) 输入量"e_c"隶属函数曲线　(c) 输出量"K_p"隶属函数曲线

(d) 输出量"K_i"隶属函数曲线　(e) 输出量"K_d"隶属函数曲线

图16　定速巡航模糊PID控制输入输出变量隶属函数

Figure 16　Membership functions of input and output variables for fuzzy PID control of cruise control

定速巡航控制分为两种情况，分别是加速达到期望速度和减速达到期望速度。定速巡航控制系统中，下层控制器中的输入是上层控制器输出的期望加速度与实际加速度的偏差e和偏差的变化率e_c，输出是PID控制的三参数K_p、K_i、K_d。模糊规则制定过程中响应时间和超调量都需要综合考虑，超调量影响喷雾机平稳行驶性，由于喷雾机药罐里药液质量较大，意味着喷雾机施加的加速度不能太大，否则较大加速度易引起药罐内液体晃动程度剧增，降低喷雾机行驶安全性。

当加速度偏差e的绝对值很大时，为保障喷雾机尽快达到巡航速度，则应快速减小偏差，此时需加大调节幅度来增加喷雾机速度，增加K_p、K_i的值，同时为避免调节提前制动使调节时间延长，应适当减小K_d的值。

当加速度偏差e的绝对值较大时，为减小控制系统的稳态误差，以便尽快达到设定的巡航加速度，适当增大K_p，根据偏差变化率e_c大小，适当增大K_i，同时为在保障K_p的控制强度同时短时间内减小系统的超调量，保证喷雾机行驶安全稳定，可适当增加K_d。

当加速度偏差e的绝对值较小时，即喷雾机实际速度与用户设定速度相差不大，此时应在继续减小稳态误差的同时，避免产生较大的超调量影响喷雾机行驶稳定性，应保持K_p和K_i大小适中，并小幅增大K_d。

基于上述分析，制定如下定速巡航模糊PID控制规则，如表2所示。

通过上述制定规则对PID控制三参数K_p、K_i、K_d进行控制过程中实时校正，同时在Matlab模糊逻辑设计模块根据以上规则表编辑规则共49条。在输入规则后得到输入变量与输出变量K_p、K_i、K_d对应的特性曲线如图17所示。

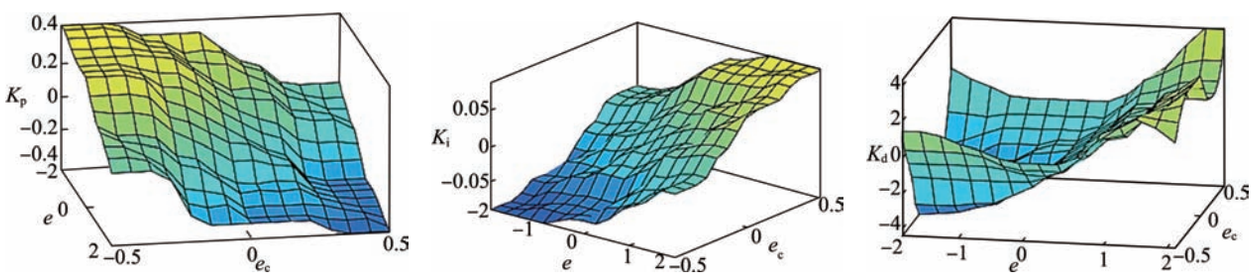
由于模糊控制器的数输出量是一个模糊值，需将模糊推理结果反模糊化才能得到输出量的精确值。为了获得准确的控制量，就要求模糊方法能够很好的表达输出隶属度函数的计算结果。本文在Matlab模糊控制工具箱采用centroid面积重心法进行反模糊化，重心法是取隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心，作为模糊推理的最终输出值，该方法具有平滑的输出控制。

在Matlab/Simulink中建立喷雾机定速巡航模糊PID控制系统仿真如图18所示，模糊控制器的输入量为加速度偏差以及偏差的变化率，输出为PID控制器的参数K_p、K_i、K_d；这3个参数与单纯PID控制时系统的比例、微分、积分增益相加，所得值与偏差经过比例、积分、微分运算再求和，最终输出量为车辆的加速度控制值，经调试后确定其最佳模糊PID最初参数k_p为2.5，k_i为2.8，k_d为0.01。

表 2 参数 K_p、K_i、K_d 控制规则调整表

Table 2 Adjustment table for control rules of parameters K_p, K_i, and K_d

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NM	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB



(a) 输入变量与 K_p 对应特性曲线 (b) 输入变量与 K_i 对应特性曲线 (c) 输入变量与 K_d 对应特性曲线

图 17 输入与输出变量对应特性曲线

Figure 17 Corresponding characteristic curves of input and output variables

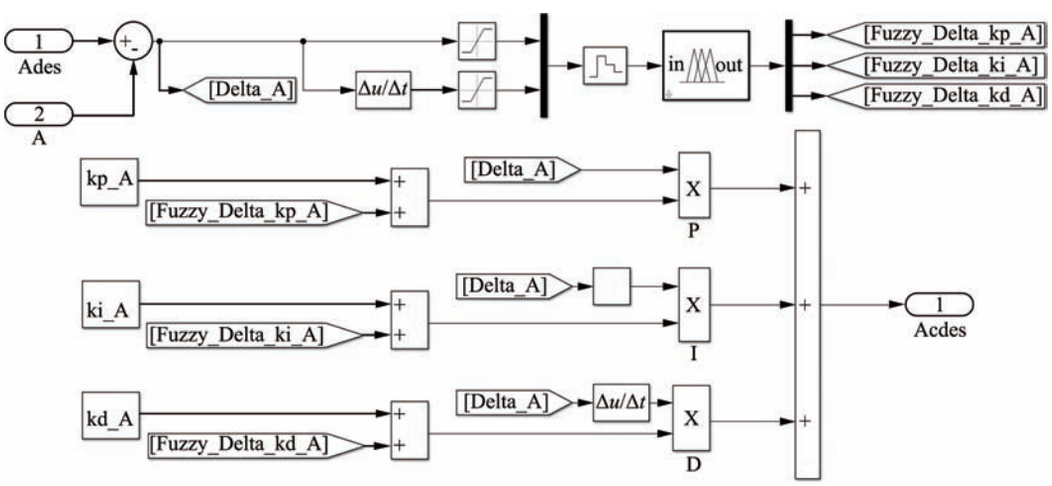


图 18 喷雾机定速巡航模糊 PID 控制系统仿真

Figure 18 Simulation of the fuzzy PID control system for constant speed cruising of a sprayer

3 系统性能验证

3.1 四轮转矩分配模型验证

本文所研究的喷雾机为四轮独立驱动,由于喷雾机作业路况复杂,会出现行驶在斜坡上作业的情况,此时为保障各驱动轮输出最佳驱动转矩,控制器可根据由车身姿传感器采集的车身侧倾角、俯仰角来控制轮毂电机输出不同驱动转矩,同时也确保喷雾机具有足够的动力输出。为验证所搭建的四轮转矩分配模型的正确性,现分别在喷雾机车身俯仰角为 0°、侧倾角为 0°、侧倾和俯仰角度均为 0°以及均不为 0°时开展仿真。

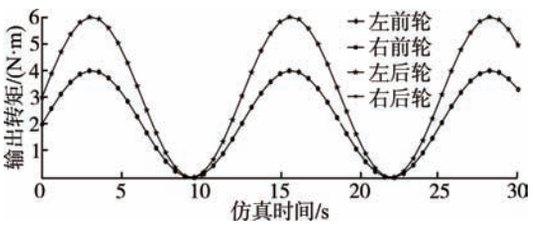
为使仿真试验符合实际作业情况,将 10°的车身俯仰角类比于实际喷雾机在斜坡上作业时的角度。在实际作业中,喷雾机可能会遇到坡度较大的斜坡,此时喷雾机的俯仰角度可能会达到 10°或更高。此处将 10°的坡度作为一个合理的参考值,用于仿真试验中设定车身俯仰角的参数,以此验证四轮转矩分配模块的正确性。

工况一：喷雾机在水平道路上行驶，此时车身无侧倾和俯仰情况，设定输入整车期望转矩为正弦曲线信号类型，振幅、偏置、频率分别设置为100、100、0.5，仿真时间30 s，各轮毂电机输出转矩曲线如图19(a)。

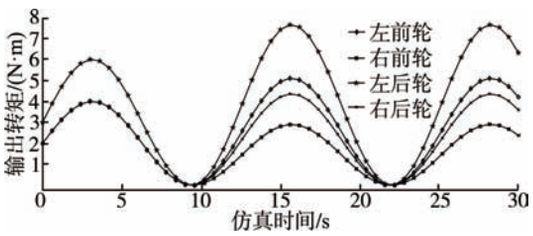
工况二：喷雾机0～10 s在水平道路上行驶，无侧倾和俯仰情况，10～30 s在斜坡上行驶，此时车身具有10°侧倾角，俯仰角为0°，航向角为90°，输入信号与工况一相同，各轮毂电机输出转矩曲线如图19(b)。

工况三：喷雾机0～10 s在水平道路上行驶，无侧倾和俯仰情况，10～30 s在斜坡上行驶，此时车身具有10°俯仰角，侧倾角为0°，航向角为0°，输入信号与工况一相同，各轮毂电机输出转矩曲线如图19(c)。

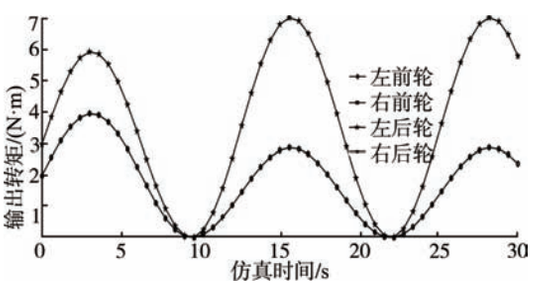
工况四：喷雾机0～10 s在水平道路上行驶，无侧倾和俯仰情况，10～30 s在斜坡上行驶，此时车身具有10°俯仰角，侧倾角为10°，输入信号与工况一相同，各轮毂电机输出转矩曲线如图19(d)。



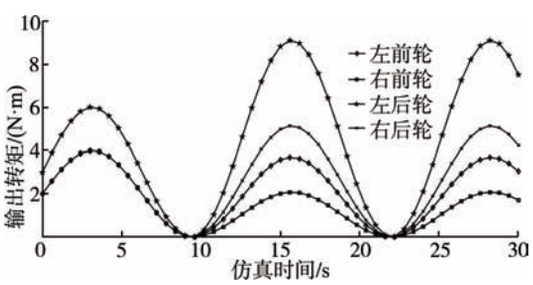
(a) 工况一下转矩分配情况



(b) 工况二下转矩分配情况



(c) 工况三下转矩分配情况



(d) 工况四下转矩分配情况

图19　不同工况下各轮毂电机转矩分配

Figure 19　Torque distribution of individual wheel hub motors under different operating conditions

通过对四个工况进行仿真，分析可得：

1)在工况一下，由于喷雾机行驶在水平路面，此时仅以喷雾机质心位置作为最佳转矩分配标准，由前文建立数学模型可知，质心处于喷雾机后半段且喷雾机左右两侧质量相等，因此两个后轮驱动力矩相等且略大于两前轮驱动力矩；

2)在工况二下，前10 s与工况一分配情况一致，10 s后喷雾机驶上斜坡并具有10°侧倾角，同时由于航向角为90°，喷雾机左侧两车轮处于下方，由于质心位置靠后，因此左后轮应具有最大驱动力矩；

3)在工况三下，前10 s与工况一分配情况一致，10 s后喷雾机驶上斜坡并具有10°俯仰角，此时两后轮驱动力矩相同，两前轮驱动力矩相同，且后轮驱动力矩大于前轮驱动力矩；

4)在工况四下，前10 s与工况一分配情况一致，10 s后喷雾机驶上斜坡并具有10°俯仰角以及侧倾角，此时左后轮具有最大驱动力矩。

由仿真结果可知，通过转矩分配模块所分配的转矩符合实际各车轮受力情况，可使喷雾机在斜坡行驶时输出更合理的转矩，从而确保行驶的稳定及安全性。

3.2　喷雾机定速巡航控制验证

在已建立纵向动力学系统模型和控制模型的基础上开展喷雾机定速巡航控制仿真，考虑到喷雾机实际作业时为保证药液覆盖率及行驶安全性，同时满足喷雾机正常工作效率，常用行驶速度为3～8 km/h，因此根据其实际行驶速度在两种典型工况开展仿真试验。

1)在喷雾机转场运输过程中对设定速度的定速巡航效果进行验证，对如下典型工况进行仿真：喷雾机在水平道路上行驶并具有5 km/h的初速度，初始加速度为0 m/s^2，此时喷雾机自重不改变，为验证控制系统鲁棒性，对其添加坡道变化的外部干扰，在5～10 s使其车身具有10°俯仰角；其速度及加速度仿真结果如图20、图21所示。

通过对其仿真可得，该系统对速度响应时间较短，不到0.1 s，最大稳态误差接近0，超调量为1.6%；在5 s时，系统对于坡度变化很敏感，能快速对车身姿态的改变做出响应，并在2 s内系统再次回归稳定。

2)在喷雾机作业过程中对定速巡航效果进行验

证,对如下典型工况进行仿真:喷雾机在田间以初速度为0开始行驶,用户每隔一段时间即调整设定的期望速度,同时,随着喷药工作进行,喷雾机整备质量逐渐减低,从15 s开始到仿真结束加入坡度干扰,使其一直具有10°的俯仰角;其速度及加速度仿真结果如图22、图23所示。

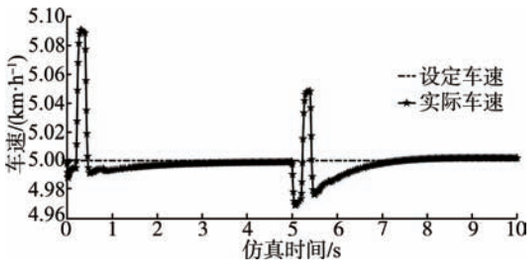


图20 速度跟踪曲线

Figure 20 Speed tracking curve

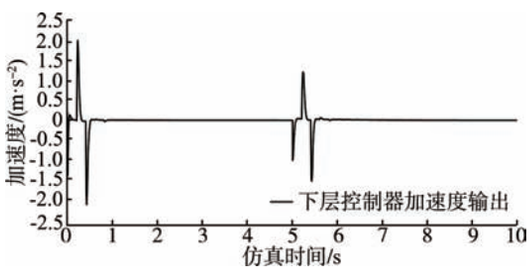


图21 加速度输出曲线

Figure 21 Acceleration output curve

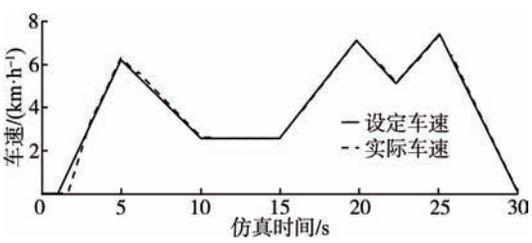


图22 速度跟踪曲线

Figure 22 Speed tracking curve

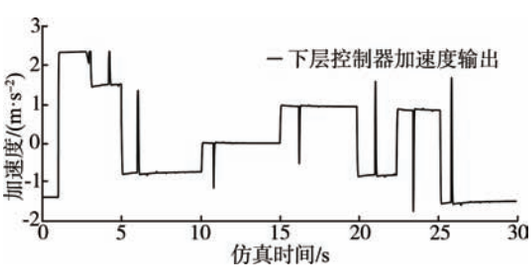


图23 加速度输出曲线

Figure 23 Acceleration output curve

通过对其仿真可得,即使面对用户持续对期望车速调整的情况,该定速巡航系统也能保持很好的速度跟踪性,系统响应时间不到0.2 s,超调量以及稳态误差均很小,在面对来自路面坡度这种外部干扰时也可以表现出较好的鲁棒性。

4 结论

1)基于高地隙自走式电动喷杆喷雾机纵向动力学特性分析,通过简化假设并结合实车相应数据,建立纵向动力学系统模型;其中,针对底盘四轮独立驱动的特点,并考虑喷雾机处于坡道行驶时的复杂车身姿态,设计了四轮转矩分配策略,为复杂路况下的各车轮提供最佳驱动转矩。

2)基于所搭建的纵向动力学模型采取分层控制方法对喷雾机开展定速巡航控制研究,为更好地克服外界干扰及自重变化的影响设计了PID控制及模糊PID控制器。通过在典型工况下的仿真,并结合两个工况下的定速巡航控制仿真试验数据表明:系统的超调量在2%以内,响应时间小于0.2 s,稳态误差趋于0,验证了所采用的控制算法的准确性,且该控制系统具有良好的跟踪速度和准确度,保障了喷雾机在面对外部干扰时定速巡航的稳定性和安全性。

3)随着对高地隙自走式电动喷雾机定速巡航控制方法的深入研究,未来该技术将朝着智能化、高效节能、多目标优化等方向不断发展,可广泛应用于农业、林业、牧业等领域的自走式机械的行驶速度控制,有助于提高生产效率和质量,减少资源浪费和环境污染。

参 考 文 献

[1] 韩科立, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 165−170.
HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Joint control method of speed and heading of navigation tractor based on optimal control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 165−170.

[2] 景亮, 张亚飞, 沈跃, 等. 四轮独立驱动高地隙无人喷雾机轨迹跟踪自适应控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 408−416.
JING Liang, ZHANG Yafei, SHEN Yue, et al. Adaptive trajectory tracking control of 4WID high clearance unmanned sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 408−416.

[3] 王卓, 刘知祥, 白晓平, 等. 拖拉机定速巡航系统纵向加速度跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 21−28.
WANG Zhuo, LIU Zhixiang, BAI Xiaoping, et al. Longitudinal acceleration tracking control of tractor cruise system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 21−28.

[4] 赵春江, 魏传省, 付卫强, 等. 静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4):

359－365.
ZHAO Chunjiang, WEI Chuansheng, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of cruise control system for hydrostatic transmission tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 359－365.

[5] 解来卿，罗禹贡，李升波，等．分布式电驱动车辆的ACC协同控制[J]．汽车工程，2018，40(6)：652－658，665.
XIE Laiqing, LUO Yugong, LI Shengbo, et al. Coordinated control for adaptive cruise control system of distributed drive electric vehicles [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(6): 652－658, 665.

[6] 张国苗，王艳华，王富富，等．基于DDEV自适应巡航行驶稳定性研究[J]．机械制造与自动化，2023，52(5)：190－193，221.
ZHANG Guomiao, WANG Yanhua, WANG Fufu, et al. Research on stability of adaptive cruise based on DDEV [J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(5): 190－193, 221.

[7] 杨澜，赵祥模，吴国垣，等．智能网联汽车协同生态驾驶策略综述[J]．交通运输工程学报，2020，20(5)：58－72.
YANG Lan, ZHAO Xiangmo, WU Guoyuan, et al. Review on connected and automated vehicles based cooperative eco-driving strategies [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 58－72.

[8] 张丽萍，刘猛，刘志刚，等．车辆自适应巡航分层控制系统的联合仿真研究[J]．机械设计与制造，2022(5)：69－72，77.
ZHANG Liping, LIU Meng, LIU Zhigang, et al. Joint simulation of vehicle adaptive cruise hierarchical control system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(5): 69－72, 77.

[9] 董胜，袁朝辉，谷超，等．基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]．农业工程学报，2017，33(8)：1－11.
DONG Sheng, YUAN Zhaohui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 1－11.

[10] 韩树丰，何勇，方慧．农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述[J]．浙江大学学报(农业与生命科学版)，2018，44(4)：381－391，515.
HAN Shufeng, HE Yong, FANG Hui. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: A review [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2018, 44(4): 381－391, 515.

[11] COEN T, SAEYS W, MISSOTTEN B, et al. Cruise control on a combine harvester using model-based predictive control [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 47－55.

[12] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1): 287－298.

[13] 苗中华，李闯，韩科立，等．基于模糊PID的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J]．农业机械学报，2015，46(4)：9－14，27.
MIAO Zhonghua, LI Chuang, HAN Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 9－14, 27.

[14] 何杰，朱金光，张智刚，等．水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]．农业机械学报，2019，50(3)：17－24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17－24.

[15] 韩晓峰．直流电机PWM－H桥双闭环可逆调速仿真研究[J]．电子设计工程，2020，28(8)：154－159.
HAN Xiaofeng. Simulation research on double-closed reversible speed regulation of DC motor PWM－MH bridge [J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(8): 154－159.

[16] 陈智，王贵锋．模糊PID算法的双闭环直流电机调速系统[J]．电子科技，2017，30(7)：33－36.
CHEN Zhi, WANG Guifeng. Fuzzy PID algorithm of double closed loop DC motor speed regulation system [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(7): 33－36.

[17] 吕安涛，毛恩荣，宋正河，等．一种拖拉机自动驾驶复合模糊控制方法[J]．农业机械学报，2006(4)：17－20.
LÜ Antao, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. A complex fuzzy control technique of tractor automatic steering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006(4): 17－20.

[18] KAIZU Y, YOKOYAMA S, IMOU K, et al. Vision-based navigation of a rice transplanter [C]//International Commission of Agricultural Engineering (CIGR) International Conference. 2004: 144－147.

[19] 周俊，姬长英．视觉导航轮式移动机器人横向预测模糊控制[J]．农业机械学报，2002(6)：76－79.
ZHOU Jun, JI Changying. Lateral predictive fuzzy logic control for wheeled mobile robot navigated by machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002(6): 76－79.

[20] Noguchi N, Will J, Reid J, et al. Development of a

master-slave robot system for farm operations [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1−19.

[21] 周佳扬. 基于模糊PID方法的车辆自适应巡航控制系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
ZHOU Jiayang. Study on fuzzy PID method for adaptive cruise control system of vehicles [D]. Xi′an: Chang′an University, 2020.

Research on constant speed cruise control of 4WID high ground clearance self-propelled electric sprayer

HU Chenwei, CHEN Yu*, CAO Jiayu, CHEN Yuxiang, ZHANG Shuo, CHEN Jun

(*College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: In response to the problems of poor speed stability and degraded spraying quality of 4WID high-clearance self-propelled electric sprayers caused by changes in external road gradients and lowered payloads resulted from internal liquid spraying under complex operating conditions, a fixed-speed cruise control algorithm with a layered control approach is proposed based on an analysis of the structure and longitudinal dynamic characteristics of 4WID high-clearance self-propelled electric sprayers. The control algorithm model receives the user-specified desired speed and inputs acceleration control signals to the longitudinal dynamic system model through algorithmic calculation to realize the tracking of the sprayer to the desired speed. The structure of the longitudinal dynamic system mainly includes five parts: the inverse longitudinal kinematic model, the acceleration-braking switching model, the torque allocation model, the motor model, and the longitudinal kinematic model. The inverse longitudinal kinematic and longitudinal kinematic models of the sprayer can be obtained by analyzing the force on the body of the sprayer under the condition of driving on a slope. Meanwhile, in order to establish a reasonable four-wheel torque allocation strategy, the analysis is conducted under the condition that the sprayer has both pitching and tilting motions of the body, and the slip rate of each driving wheel is used as the basis for allocation, ensuring the optimal torque moment of each wheel under different operating conditions and ensuring the balanced power of the sprayer. The speed cruise control adopts a layered control approach, which realizes the effective tracking of the speed of the spraying machine through the establishment of the upper PID control and the lower fuzzy PID control. By defining fuzzy control rules, the PID parameters of the lower layer controller are automatically adjusted to ensure the good adaptability of the speed cruise control system to various complex operating conditions. A control model is established using Matlab/Simulink, and the control system is simulated and analyzed. The experimental results show that the designed speed cruise control system can effectively control the speed of the sprayer under typical operating conditions. Specifically, the performance of the system is excellent under conditions of external disturbance and self-weight variation, with overshoot less than 2%, response time less than 0.2 s, and steady-state error approaching 0, verifying the accuracy of the control algorithm used.

Keywords: self-propelled electric sprayer; cruise control system; four-wheel independent drive; longitudinal dynamics model; fuzzy PID control