

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.003

高地隙四轮驱动喷雾机防滑系统控制仿真与试验*

倪 静¹ 毛罕平¹ 韩绿化¹ 张晓东¹ 顾 建² 左志宇¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏大学工程训练中心, 镇江 212013)

【摘要】 建立了高地隙四轮驱动喷雾机底盘工作过程中的运动模型,以相对滑转率为控制目标,提出了一种基于模糊控制的防滑控制系统。设计了防滑控制器,在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真,构建了防滑电液系统试验装置,进行了模拟试验,结果表明高地隙四轮驱动喷雾机的电液防滑控制系统效果良好,控制响应时间 1.85 s,精度达到 97.3%。

关键词: 喷雾机 四轮驱动 防滑控制 仿真 试验

中图分类号: S49; S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0013-04

Simulation and Test on Anti-skid System Control for Four-wheel Drive of High Clearance Spray Machine

Ni Jing¹ Mao Hanping¹ Han Lühua¹ Zhang Xiaodong¹ Gu Jian² Zuo Zhiyu¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Engineering Training Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A motion model of a high clearance four-wheel drive spray machine chassis of the work process was established and a slip control based on fuzzy control system was realized through the relative slip rate as control objectives. Anti-skid controller was designed, simulation had been carried out by Matlab/Simulink and the anti-skid electro-hydraulic system test device was constructed. The simulated test results showed that the four wheel drive high clearance spraying electro-hydraulic anti-skid control system worked well, the control response time was 1.85 s, and the control precision reached to as accurate as 97.3%.

Key words Spray machine, Four-wheel drive, Anti-skid control, Simulation, Test

引言

高地隙四轮驱动喷雾机作业过程中由于地面的突变极易出现四个车轮转速不一致,产生某一个或两个车轮打滑的现象,地面的突变主要包括坑、深泥脚和过坎等;另外在爬坡时因为附着力不够,使两个前轮产生打滑。车轮打滑时影响液压系统的流量分配,使得机车无法正常作业,必须进行防滑控制。防滑控制系统是通过控制对轮边马达的流量进行控制来防止滑转,以有效保证各种地面条件下高地隙四轮驱

动喷雾机的行驶稳定性、安全性和单位面积施药作业量。

随着现代控制理论的发展,国内外学者分别用频率响应、PID 控制、线性最优控制和滑模变结构控制等方法对防滑控制进行研究^[1~4]。基于精确数学模型的各种控制器难以适应车辆系统的非线性和时变性,模糊控制基于设计者对系统的理解以及对系统规则的归纳,无需被控对象的数学模型,具有控制系统不确定性和复杂性的优点,鲁棒性好。本文结合模糊控制的特点,提出针对四轮驱动的防滑模糊

收稿日期: 2010-07-28 修回日期: 2010-08-16

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100901)

作者简介: 倪静, 硕士生, 主要从事机械系统监测与控制研究, E-mail: njow007@163.com

通讯作者: 毛罕平, 教授, 博士生导师, 主要从事机械系统监测与控制、计算机视觉研究, E-mail: maohp@ujs.edu.cn

控制方法。由于高地隙四轮驱动喷雾机重达 8 t, 液压控制系统较为复杂, 为了提高设计和试验的科学性, 缩短研发周期, 对防滑控制系统进行仿真和实验室模拟试验研究。

1 高地隙底盘运动模型

在仿真分析和模拟试验中首先要确定参考车速和相对滑转率, 建立车轮的数学模型。

本文采用单轮车辆模型对高地隙四轮驱动喷雾机进行建模分析^[5]。考虑车轮滚动阻力及车辆风阻, 不考虑车辆的横向运动。单轮高地隙的受力分析如图 1 所示。

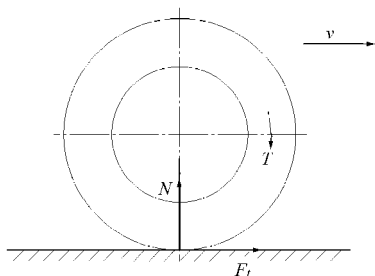


图 1 高地隙底盘单轮受力分析图

Fig. 1 Analysis on single round force of high clearance chassis

由受力分析得到运动微分方程为

$$m\dot{v} = F_t - \phi N \quad (1)$$

$$T = qp\eta_m / (2\pi) \quad (2)$$

$$F_t = T/R \quad (3)$$

式中 m ——整机质量 v ——行驶速度

F_t ——轮胎与路面间的附着力

ϕ ——附着系数

N ——轮胎与路面间的垂直载荷

T ——液压马达作用在轮上的力矩

q ——马达流量 p ——管路压力

η_m ——马达机械效率 R ——车轮半径

本文研究四个车轮相对的打滑情况, 所以以转速最低的车轮作为基准, 该转速为 n_1 。采用如图 2 所示^[6]附着系数与滑转率的关系来确定转速 n_1 所需要的附着系数, ϕ_m 为期望滑转率 s_0 所对应的附着系数。土路时滑转率 $s_0 \in (0.05, 0.15)$, 如图 3 所示^[7], 在此范围内, 轮胎和地面间的纵向附着系数最大。取 $s_0 = 0.05$, 则由式(1)~(3)可得出行驶速度 v , 并得

$$n_1 = \frac{v}{2\pi R(1-s_0)} \quad (4)$$

各轮相对滑转率计算公式为

$$s_{z_i} = \frac{n_i - n_1}{n_i} \quad (i=2,3,4) \quad (5)$$

考虑到转速最低的车轮本身也有一定的滑转, 为保证其他车轮工作在理想的滑转率 ($s_0 \in (0.05, 0.15)$) 范围内, 取期望的相对滑转率 $s_z = 0.05$ 。

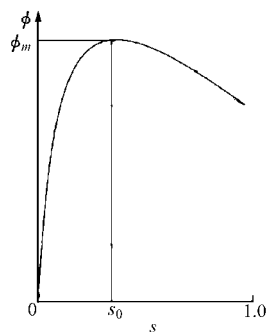


图 2 附着系数与滑转率关系曲线

Fig. 2 Curve of adhesion coefficient and slip rate

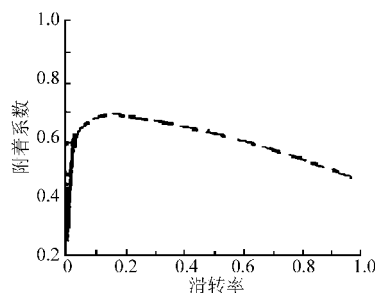


图 3 土路滑转率与附着系数关系曲线

Fig. 3 Curve between adhesion coefficient and slip rate of dirt road

2 防滑模糊控制算法设计

液压系统原理如图 4 所示, 正常行走时分流阀将流量等量分配给轮边马达, 当某一轮(例如左后轮)发生打滑时控制器发出控制信号, 使通过比例流量阀的流量重新分配实现防滑控制。

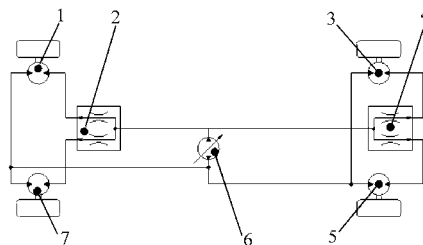


图 4 四轮驱动底盘防滑液压系统原理图

Fig. 4 Anti-skid hydraulic system schematic of four-wheel drive chassis

1. 左后轮轮边马达 2. 比例流量阀 3. 左前轮轮边马达 4. 比例流量阀 5. 右前轮轮边马达 6. 柱塞液泵 7. 右后轮轮边马达

根据高地隙四轮驱动防滑系统的原理, 基于相对滑转率的模糊控制器采用二维控制器形式。定义系统误差 $E = -(s - s_z)$ 及误差变化率 \dot{E} , E 和 \dot{E} 为控制系统输入量, 输出量 U 为控制比例流量阀的电压信号, 系统模糊控制算法采用 Mamdani 推理法。

2.1 控制量的模糊化及隶属函数设计

控制系统需要模糊化的精确量有: E 、 \dot{E} 及 U , E 的变量等级为 8 级, 分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、负零(NO)、正零(PO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB); \dot{E} 及 U 变量等级为 7 级, 分别为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。隶属函数选用灵敏度较高的三角形函数, 如图 5 所示。

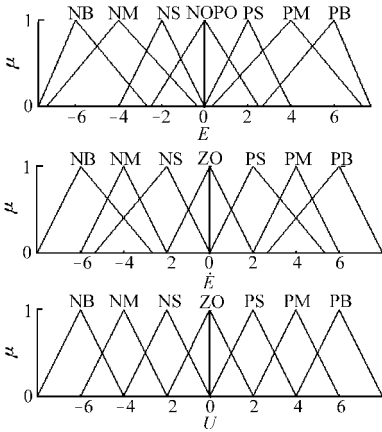


图 5 E 、 \dot{E} 、 U 的隶属函数

Fig. 5 Membership function of E , \dot{E} , U

2.2 控制规则表建立

假定通过轮边马达的流量和比例流量阀的电压呈线性关系, 根据高地隙行驶中相对滑转率、误差变化率与液压马达流量之间的关系, 制定出表 1 所示的模糊控制规则集。

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 Fuzzy control rule table

\dot{E}	E							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PM	PB	PB

3 控制系统仿真

利用 Matlab 软件提供的模糊控制工具箱 Fuzzy Logic Toolbox, 建立模糊控制规则和隶属函数, 最终建立一个二输入单输出的模糊控制器^[7]。在 Simulink 模块中, 建立单轮打滑模糊控制器的仿真模型, 如图 6 所示。如果相对滑转率小于 0.05, 则认为此轮不打滑; 若相对滑转率大于 0.05, 通过模糊控制器将相对滑转率控制在 0.05。建立相对滑

转率计算模型、运动模型, 将这些模型和模糊控制器连接起来, 得到基于相对滑转率的防滑控制系统模型, 如图 7 所示。模糊控制模型得到控制电压信号, 通过转速与电压的函数关系 (图 8) 得到转速调节量, 由运动模型得到转速 n_1 , 进而计算出滑转率。

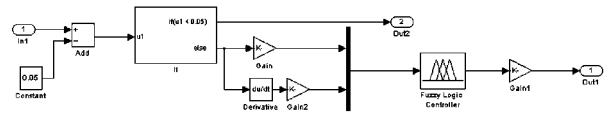


图 6 模糊控制仿真模型

Fig. 6 Simulation model of fuzzy control

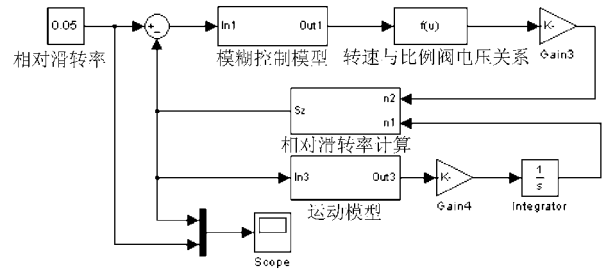


图 7 防滑控制系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of anti-skid control system

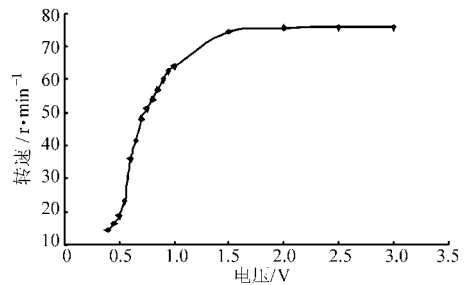


图 8 转速与比例阀激励电压关系曲线

Fig. 8 Curve between speed and excitation of voltage proportional valve

液压马达型号为 5MCM14-1B, 液比例流量阀型号为 QVKZOR-TE-10/65 20, 比例流量阀的响应时间为 30 ms。通过标定试验, 得到液压马达转速与比例流量阀激励电压的关系如图 8 所示。可以看出, 激励电压在 1 V 以下时转速与电压近似呈线性关系, 因此模拟试验选择在 0.5 ~ 1 V 区间进行试验调节。

高地隙四轮驱动喷雾机的参数为: 质量 $m = 8 \text{ t}$, 轮胎半径 $R = 782.5 \text{ mm}$, $s_2 = 0.05$, 输入仿真模型中得到相对滑转率曲线如图 9 所示。从图中可以看出, 采用模糊控制可在 2 s 后达到期望的最佳相对滑转率。

4 模拟试验

根据高地隙四轮驱动防滑系统的原理, 构建了模拟试验装置, 图 10 所示为其中一个车轮的液电控制系统。电动机带动液压泵, 液电比例流量控制阀

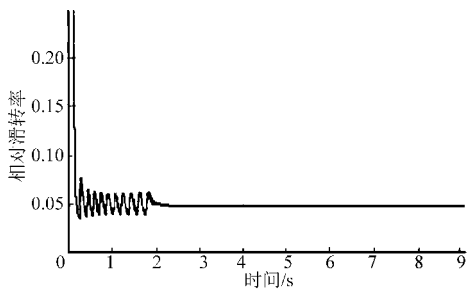


图9 相对滑转率仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of relative slip rate

调节液压马达的流量从而改变马达转速,加载液压泵通过调节节流阀来实现模拟加载,转速传感器信号输入控制器,控制器比较两路转速传感器的信号判断某一轮打滑,发出信号控制比例阀芯开口大小从而控制液压马达的转速,实现防滑控制模拟。

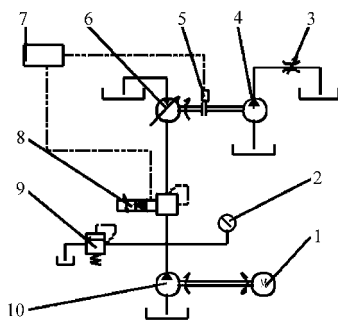


图10 模拟试验装置原理图

Fig. 10 Schematic of simulated test equipment

1. YS8034 型电动机
2. 压力表
3. DRV8-10/2 型节流阀
4. VP-12-F 型加载液压泵
5. SMGC25-1KR-P1-O4/F1 型转速传感器
6. 5MCM14-1B 型液压马达
7. 控制器
8. QVKZOR-TE-10/65 20 型电液比例流量阀
9. Y-D6B 型溢流阀
10. VP-12-F 型液压泵

模拟试验时将高地隙底盘直线正常行驶的车轮转速 36 r/min 取为期望转速。图 11 为起始转速为 64、60、54、48 r/min 时转速调控变化曲线,它综合反映了比例流量阀、驱动马达等关键部件的响应特性以及控制算法性能,表明电液防滑控制系统动态响应性能良好。

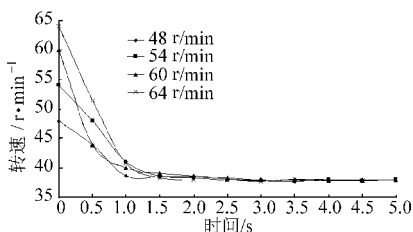


图11 转速控制变化曲线

Fig. 11 Speed control curves

图 12 为发生打滑的车轮转速分别为 64、60、54、48 r/min 时相对滑转率随时间变化控制效果图。定义控制响应时间为控制器发出信号到相对滑转率达到期望值的时间,控制精度为实际相对滑转率与期望相对滑转率的符合程度。

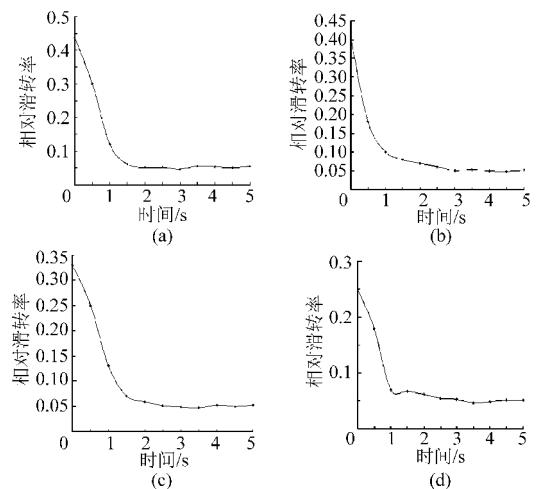


图12 不同转速下的防滑控制结果

Fig. 12 Anti-skid control results under four different speeds

- (a) 64 r/min (b) 60 r/min (c) 54 r/min (d) 48 r/min

表 2 为不同转速时的防滑控制效果,控制器的平均响应时间为 1.85 s,平均控制精度达到了 97.3%,而设计要求防滑控制响应时间为 3 s,控制精度为 95%,模拟试验能够很好地消除打滑现象。

表2 不同转速下防滑控制性能

Tab. 2 Anti-skid control analysis under different speeds

转速/ $r \cdot \min^{-1}$	响应时间/s	控制精度/%
64	1.8	97.8
60	2.0	98.2
54	2.0	96.0
48	1.6	97.2

5 结论

(1) 基于滑转率的模糊控制算法,具有模糊控制对不确定和非线性对象的快速控制能力,发挥了模糊控制鲁棒性强的优点。

(2) 仿真结果和模拟试验均表明,高地隙四轮驱动底盘采用模糊控制的防滑系统在作业过程中能有效消除打滑现象,由模拟试验结果可以得出设计的模糊控制器的平均响应时间为 1.85 s,平均控制精度达到了 97.3%,均达到了较理想的效果。

参考文献

- 1 Sakai S, Sado H, Mori Y. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999,4(1): 9~16.

- with an inner chamfer on the adherends[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2008, 28(1~2):71~76.
- 3 Fessel G, Broughton J G, Fellows N A, et al. Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007, 27(7):574~583.
 - 4 余海洲,游敏,郑小玲,等. 单搭接接头胶层间隙对强度和应力的影响[J]. *机械强度*, 2006, 28(5):775~779.
Yu Haizhou, You Min, Zheng Xiaoling, et al. Effect of adhesive of recessing on the strength and stress of single-lap joint[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2006, 28(5):775~779. (in Chinese)
 - 5 孔凡荣,游敏,郑小玲,等. 胶粘剂力学性能参数对劈裂载荷作用下胶接头中应力分布的影响[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(4):110~114.
Kong Fanrong, You Min, Zheng Xiaoling, et al. Effect of mechanical parameters of adhesive on stress distribution of adhesive bonded joints under cleavage loading[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(4):110~114. (in Chinese)
 - 6 Xia Yong, Zhou Qing, Wang P C, et al. Development of a high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, part I: static experiments and simulations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4):414~426.
 - 7 Xia Yong, Zhou Qing, Wang P C, et al. Development of a high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, part II: dynamic experiments and simulations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4):427~433.
 - 8 Lang T P, Mallick P K. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1998, 18(3):167~177.
 - 9 Belingardi G, Goglio L, Tarditi A. Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002, 22(4):273~282.
 - 10 Hart-Smith L J. Adhesive bonded single lap joints [R]. NASA Contract Report 115536, 1973.
 - 11 Adams R D, Comyn J, Wake W C. Structural adhesive joints in engineering [M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1997.
 - 12 Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints [J]. *J. Appl. Mech.*, 1944, 11(1):17~27.
-

(上接第16页)

- 2 Mz X J, Sun Z Q, He Y Y. Analysis and design of fuzzy controller and observer [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 1998, 6(1):41~51.
- 3 刘志新,张大卫,李幼德. 基于滑转率的四轮驱动汽车防滑模糊控制仿真 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(12):21~24.
Liu Zhixin, Zhang Dawei, Li Youde. Research on acceleration slip regulation system for four-wheel drive vehicle using fuzzy control method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(12):21~24. (in Chinese)
- 4 郭孔辉,王德平. 汽车驱动防滑控制理论的初步研究 [J]. *吉林工业大学学报*, 1997, 87(3):1~5.
Guo Konghui, Wang Deping. A preliminary theoretical study on anti-slip regulation [J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1997, 87(3):1~5. (in Chinese)
- 5 Ming-chin Wu, Ming-chang Shih. Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control [J]. *Mechatronics*, 2003, 13:331~351.
- 6 杨化方,李军伟. 双轮驱动电动汽车防滑控制系统研究 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2009(2):14~17.
Yang Huafang, Li Junwei. Research on acceleration slip regulation system for two-wheel drive electric vehicle using fuzzy-PID control [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2009(2):14~17. (in Chinese)
- 7 王良良. 四轮驱动汽车防滑控制系统的设计 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
Wang Liangliang. Design of acceleration slip regulation for four wheel drive vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- 8 席爱民. 模糊控制技术 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.