

基于模糊自适应 PID 控制器的多轴车辆转向控制系统设计及仿真

文桂林, 韩汪利, 周 兵

湖南大学; 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082

摘要 通过对多轴转向车辆数学模型进行简化, 获得某型号五轴全路面起重机的二自由度操纵动力学模型, 并基于零质心侧偏角控制策略推导出各后轮转角与前轮转角及车速的函数关系。在比例阀和转向执行机构(液压缸)进行简化的基础上, 在 Matlab/Simulink 中建立了转向系统完整的数学模型。为克服传统 PID 控制器的缺点, 基于 Matlab 模糊逻辑控制模块建立了转向系统模糊自适应 PID 控制器, 对 PID 控制器各个控制参数进行在线整定, 以此获得较高的控制精度。以 25km/h 速度下稳态回转试验对该控制器进行仿真验证。经过仿真分析后发现, 该模糊控制器取得很好的效果, 系统响应迅速, 跟随性好, 完全能满足控制需要。

关键词 五轴全路面起重机; 二自由度模型; 零质心侧偏角控制策略; 模糊自适应 PID 控制

中图分类号 U273

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.002

Design of Multi-axle Vehicle Steering Control System and Simulation Based on Fuzzy Adaptive PID Controller

WEN Guilin, HAN Wangli, ZHOU Bing

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body; Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract A 2-DOF model of the five-axle all terrain crane with some simplifications is proposed, and based on the assumption of zero side-slip angle of mass center and the proportional control strategy, the function relating the angles of the rear and the front axles, and the velocity are derived. With some simplifications with respect to the proportional valve and the cylinder, a mathematical model of the steering system in Matlab/Simulink is established. In order to overcome the weakness of the traditional PID controller, a fuzzy adaptive PID controller of the rear axle steering angle is built in Matlab by using its fuzzy logic control toolbox. Through the real-time determination of the PID parameters, a high control precision is achieved. A steady state cornering simulation is carried out under 25km/h, and the comparison of the simulation and theoretical values shows that the fuzzy adaptive PID controller works well, with quick system response and good following performance.

Keywords five axles all terrain crane; 2-DOF model; zero side-slip angle of mass center control strategy; fuzzy adaptive PID controller

0 引言

随着工程建设和生产发展的需要, 对工程车辆提出了更高的要求, 如更大的装载能力、较小的转弯半径、更高的机动性, 以使车辆能够更快地靠近或离开作业区域, 且具备较高的稳定性, 多轴转向车辆应运而生。由于后轴主动参与转向, 使得车辆获得较高的机动性和较小的转弯半径。但是如果各轴转角控制不当, 将引起各轴转角相互影响, 导致轮胎磨损甚至影响车辆的稳定性。因此, 多轴转向车辆各轴转角的控制技术成为多轴转向车辆的关键。多轴转向技术多源于四轮

转向控制, 目前较为普遍的四轮转向控制技术有如下 4 种:

(1) 比例于前轮转角的后轮转向控制; (2) 比例于前轮转向力的后轮转向控制; (3) 比例于横摆角速度的后轮转向控制; (4) 比例于前轮转角和横摆角速度相结合的后轮转向控制^[1-3]。国内对多轴转向车辆的研究相对较晚, 且大多局限于对转向系统的结构优化^[3], 对转向控制策略的研究相对较少。目前多轴转向车辆转向控制大都基于零质心侧偏角控制策略^[4-9], 该控制策略使得车辆在任意速度下质心侧偏角都为 0, 在确保车辆良好的机动性的同时, 保证车辆的稳定性。

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-06-30

作者简介: 文桂林(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S030000843M), 教授, 研究方向为非线性振动理论与非线性动力学控制、智能车辆、车辆结构 CAE、特种装备 CAE, 电子邮箱: wenguilin@yahoo.com.cn

本文在对多轴车辆数学模型进行简化的基础上,推导出某型号五轴全路面起重机二自由度模型,并采用比例于前轮转角的后轮转向控制方法,基于零质心侧偏角控制策略设计转向系统控制器。在该五轴全路面起重机定型阶段,通过实车试验对该控制器进行验证。

1 多轴转向车辆二自由度动力学模型

本文基于如下假设对多轴转向车辆数学模型简化并获得多轴转向车辆二自由度模型:(1) 轮胎工作在线性区,侧偏力和侧偏角成正比^[4,10];(2) 忽略在转向过程中由于载荷横向转移对侧偏刚度的影响^[4,10];(3) 忽略空气动力学的影响;(4) 汽车沿 x 轴的前进速度 μ 不变^[10]。

线性二自由度多轴转向车辆模型如图 1 所示,在车辆质心处建立车辆坐标系,定义车辆的前进方向为 x 轴正方向,垂直地面向上为 z 轴正方向, y 轴正方向由右手法则确定。对于转角、横摆角速度、转矩以逆时针方向为正,其余各参数若方向与车辆坐标系各轴正方向一致则为正,否则为负。

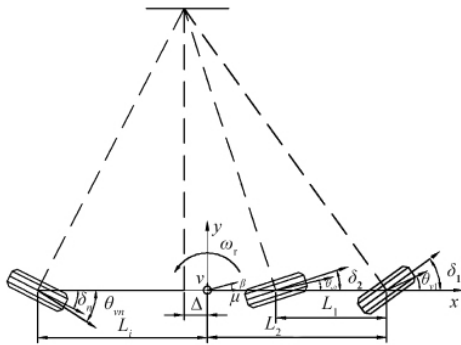


图 1 多轴车辆二自由度模型

Fig.1 2-DOF model of multi-axes vehicle

图 1 中, μ 为质心速度在 x 方向上的分量, v 为质心速度在 y 方向上的分量, δ_i 为第 i 轴车轮转角, θ_{α_i} 为第 i 轴车轮合速度与 x 轴所成夹角, β 为质心侧偏角, C_i 为第 i 轴综合侧偏刚度, α_i 为第 i 轴车轮侧偏角, L_i 为第 i 轴到质心的距离, l_i 为第 i 轴到瞬心的距离, Δ 为瞬心与质心在 x 轴方向上的距离, F_{y_i} 为第 i 轴车轮所受到的侧偏力, M_i 为第 i 轴车轮所受力对质心产生的力矩, ω_r 为横摆角速度。由图可知:

$$\theta_{\alpha_i} = \frac{v + \omega_r \cdot L_i}{u} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (1)$$

故各轴车轮侧偏角为

$$\alpha_i = \theta_{\alpha_i} - \delta_i = \beta + \frac{\omega_r L_i}{\mu} - \delta_i \quad i=1,2,3,4,5 \quad (2)$$

第 i 轴车轮侧偏力为

$$F_{y_i} = C_i \cdot \alpha_i \quad (3)$$

第 i 轴车轮侧偏力对质心产生的力矩为

$$M_i = F_{y_i} \cdot L_i \quad (4)$$

由图 1 有

$$v = \mu \cdot \tan \beta \approx \mu \cdot \beta \quad (5)$$

所以

$$\dot{v} = \dot{\mu} \cdot \beta + \mu \cdot \dot{\beta} = \mu \cdot \dot{\beta} \quad (6)$$

由式(2)一式(4)可推出该五轴转向车辆二自由度模型为

$$\begin{bmatrix} m\mu & 0 \\ 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 C_i & -m\mu + \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i \\ \sum_{i=1}^5 C_i L_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^5 C_i \delta_i \\ -\sum_{i=1}^5 C_i \delta_i L_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, I_z 为车绕质心的转动惯量。

2 零质心侧偏角控制策略

为保证所有车轮任意时刻都绕同一瞬时转动中心做纯滚动,同侧车轮转角必须满足阿克曼转向原理,即

$$\frac{\delta_i}{\delta_1} \approx \frac{\tan \delta_i}{\tan \delta_1} = \frac{l_i}{l_1} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (8)$$

由图 1 有

$$l_i = L_i - \Delta \quad i=1,2,3,4,5 \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得

$$\delta_i = \delta_1 \frac{L_i - \Delta}{L_1 - \Delta} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (10)$$

将式(10)代入式(7),化简后有

$$\begin{bmatrix} m\mu & 0 \\ 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 C_i & -m\mu + \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i \\ \sum_{i=1}^5 C_i L_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) \\ -\frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)_1} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) L_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

匀速稳态圆周行驶时,有 $\dot{\beta}=0, \dot{\omega}_r=0$,将其代入式(11)有

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 C_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i - m\mu \\ \sum_{i=1}^5 C_i L_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) \\ \frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)_1} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) L_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

由克莱姆法则可以求得

$$\beta = \frac{\begin{vmatrix} \frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i - m\mu \\ \frac{\delta_1}{(L_1 - \Delta)_1} \sum_{i=1}^5 C_i (L_i - \Delta) L_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^5 C_i & -m\mu + \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i \\ \sum_{i=1}^5 C_i L_i & \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2 \end{vmatrix}}$$

令 $\beta=0$, 得

$$\Delta = \frac{Cm\mu^2}{AC - B^2 + m\mu^2 B} \quad (13)$$

这样就使得质心侧偏角 β 在稳态时为 $0^{[1]}$, 其中, $A = \sum_{i=1}^5 C_i$,

$$B = \sum_{i=1}^5 C_i L_i, C = \sum_{i=1}^5 C_i L_i^2.$$

3 液压助力转向机构数学模型

液压助力转向系统是当今重型车辆转向助力的主流, 其结构示意图如图 2 所示。转向系统执行机构控制原理如图 3 所示。

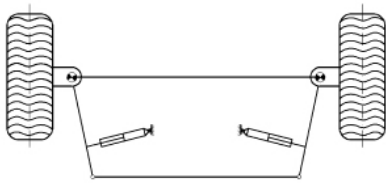


图 2 液压助力转向系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hydraulic power steering system

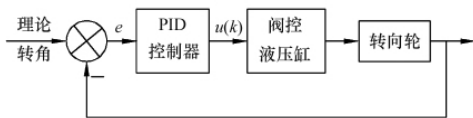


图 3 转向系统执行机构控制原理

Fig. 3 Schematic diagram of control system for the steering actuator

由图 3 可知, 转向系统执行机构控制系统主要由 PID 控制器、比例电磁阀、液压缸组成。通过建立比例电磁阀以及液压缸的数学模型, 可以得到阀控液压缸系统的传递函数:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{K}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi\omega_n}{\omega_n} + 1 \right)} \quad (14)$$

其中, K 为系统开环增益, ω_n 为液压固有频率, ξ 为液压阻尼系数。

4 模糊自适应 PID 控制器设计

PID 控制器问世至今已有近 70 年历史, 以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一, 对工业生产中温度、压力、流量的控制作用尤为明显。

但在实际工业生产中, 由于负荷的变化或者外界的干扰, 被控对象的结构参数会不断变化, 传统的 PID 控制不能很好满足精确控制的要求。自适应控制结合现代控制理论, 实时辨识被控对象的结构参数并改变控制参数, 使得控制系统的品质指标保持在最佳范围。本文运用模糊推理对被控对象结构参数进行整定, 即模糊自适应 PID 控制^[11-15]。模糊自适应 PID 控制原理如图 4 所示。该五轴全路面起重机的相关技术参数如表 1 所示。

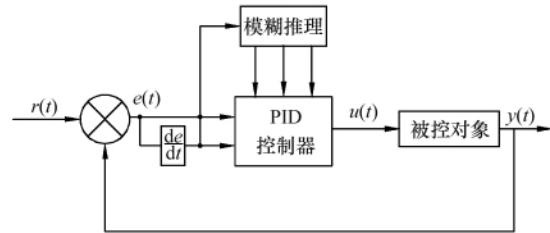


图 4 模糊自适应 PID 控制原理

Fig. 4 Principle of fuzzy adaptive PID controller

表 1 该五轴全路面起重机的相关技术参数

Table 1 Technical parameters of the five axles all terrain crane

m/kg	L_1/m	L_2/m	L_3/m
57000	3.47	0.82	-0.83
L_4/m	L_5/m	$I/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$C_1/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$
-3.2	-4.92	550637	-680
$C_2/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$	$C_3/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$	$C_4/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$	$C_5/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$
-680	-650	-600	-600
K	ξ	ω_n/Hz	
36.69	0.2	156.38	

将表 1 中的各个参数代入式 (13), 得到瞬心到质心距离 Δ 随车速变化的表达式

$$\Delta = \frac{-1697.5\mu^2}{96.49 - 6.35 + 143.59\mu^2} \quad (15)$$

将表 1 中相应参数代入式 (14), 得到阀控液压缸的传递函数为

$$G(s) = \frac{36.69}{4.109 \times 10^{-5} s^3 + 0.002564 s^2 + s} \quad (16)$$

在 Matlab/Simulink 中建立后轴转角控制系统, 如图 5 所示。

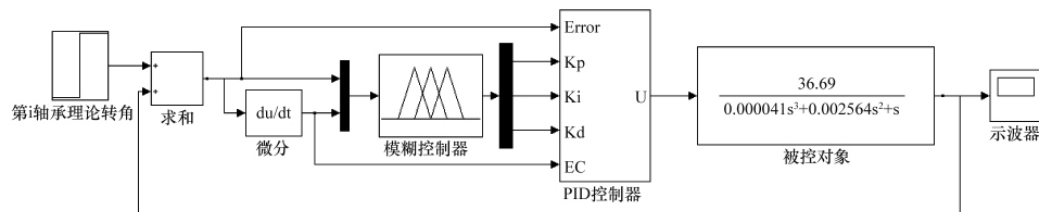


图 5 后轴转角模糊 PID 控制系统仿真模型

Fig. 5 Fuzzy adaptive PID control system for rear axle steering angle

5 仿真分析

试验测试时,在车轮主销处各安装一个角位移传感器以获得各个车轮在回转过程中转过的角度 δ_i ,在车尾安装一个非接触式速度测量仪以获得车辆试验过程中的车速。在25km/h 稳态回转(右转)试验过程中,第1轴转角 δ_1 、车速 μ 实测数据如图6所示。

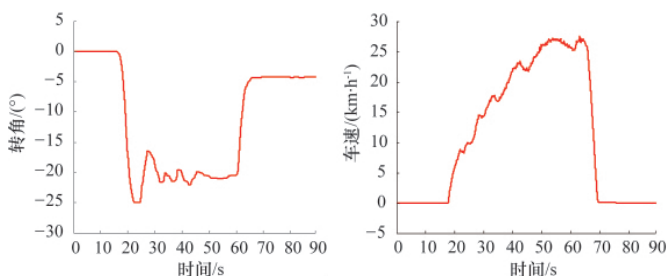


图6 第一轴转角实测数据(a)和前进车速(b)

Fig. 6 Test data of steering angle of first axle (a) and the velocity of the vehicle (b)

在后处理阶段将第1轴车轮转角 δ_1 、前进速度 μ 代入式(16),算出各后轴的理论转角,并将该控制系统的仿真输出与该理论值进行比较分析,如图7所示,结果表明,该模糊自适应PID控制器取得了很好效果,完全可以满足控制要求。

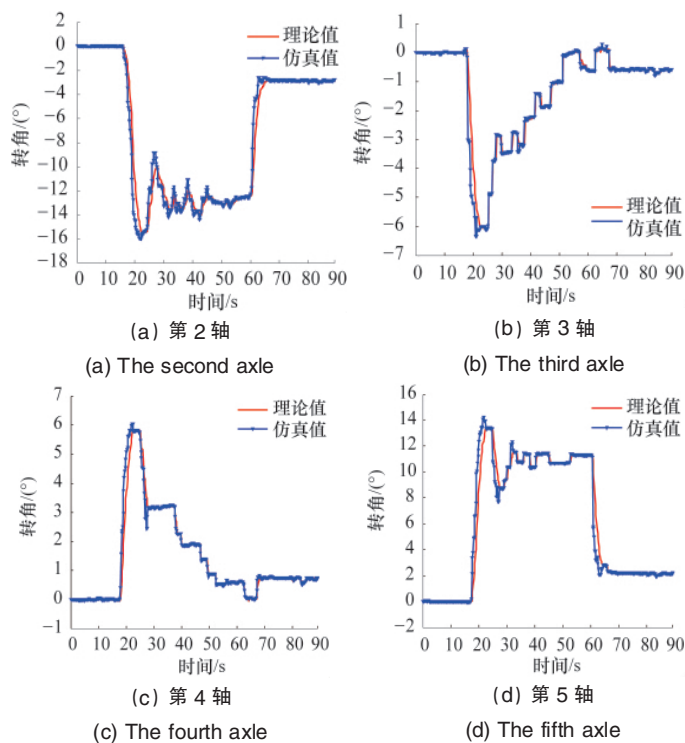


图7 第2—5轴理论转角与仿真数据对比

Fig. 7 Theoretical steering angle and test data of the 2—5 axles

6 结论

本文通过建立某型号五轴全路面起重机二自由度模型和运动微分方程,采用比例于前轮转向角的后轴转向控制方法,基于零质心侧偏角控制策略,在Matlab中建立了后轴转角模糊自适应控制系统。通过对25km/h速度下稳态回转(右

转)试验各后轴理论转角和仿真值进行对比发现,该模糊自适应控制系统取得了很好的效果,系统响应迅速,跟随性好,完全能满足实际需要。

参考文献 (References)

- [1] 安部正人, 陈新波. 汽车的运动和操纵 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
Anbu Zhengren, Chen Xinbo. Vehicle movement and manipulation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 舒进. 比例控制四轮转向车辆运动特性分析 [J]. 专用汽车, 2002(3): 16-19.
Shu Jin. *Special Purpose Vehicle*, 2002(3): 16-19.
- [3] 赵礼东, 杨新明, 徐达. 多轴转向汽车转向系的运动分析与优化 [J]. 专用汽车, 2003(6): 21-24.
Zhao Lidong, Yang Xinming, Xu Da. *Special Purpose Vehicle*, 2003(6): 21-24.
- [4] 王云超, 陈宁, 高秀华. 多轴转向车辆侧向动力学分析 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(1): 6-10.
Wang Yunchao, Chen Ning, Gao Xiuhua. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2009, 23(1): 6-10.
- [5] 杨峰, 高秀华, 周富家. 多桥转向全路面起重机模糊控制器设计 [J]. 建筑机械, 2008(3): 91-94.
Yang Feng, Gao Xiuhua, Zhou Fujia. *Construction Machinery*, 2008(3): 91-94.
- [6] 张小江, 高秀华, 赵建国, 等. 多轴转向车辆零侧偏角控制策略研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2008(6): 13-15.
Zhang Xiaojiang, Gao Xiuhua, Zhao Jianguo, et al. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2008(6): 13-15.
- [7] 王云超, 高秀华, 胡景煌, 等. 多轴转向车辆转向系统的 H_2/H_∞ 混合控制 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(8): 6-10.
Wang Yunchao, Gao Xiuhua, Hu Jinghuang, et al. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2008, 22(8): 6-10.
- [8] 王云超, 高秀华, 陈宁. 多轴转向车辆动态转向控制策略研究 [J]. 专用汽车, 2009(8): 46-49.
Wang Yunchao, Gao Xiuhua, Chen Ning. *Special Purpose Vehicle*, 2009 (8): 46-49.
- [9] Sano S, Furukawa Y, Shlralshi S. Four wheel steering system with rear wheel steer angle controlled as a function of steering wheel angle [R]. SAE Paper 860625, 1986.
- [10] 余志生. 汽车理论 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Yu Zhisheng. *Automotive theory* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 魏翠琴. 基于自适应模糊PID控制的双闭环直流调速系统 [J]. 计算机与信息技术, 2007(24): 367-368.
Wei Cuiqin. *Science & Technology Information*, 2007(24): 367-368.
- [12] 康杰. 基于MATLAB的模糊PID参数自整定仿真研究 [J]. 仪表技术, 2008(12): 20-22.
Kang Jie. *Journal of Instrumentation Technology*, 2008(12): 20-22.
- [13] 高林中. 基于MATLAB的PID控制器设计 [J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2007, 20(4): 150-151.
Gao Linzhong. *Journal of Shanxi Coal-mining Administrators College*, 2007, 20(4): 150-151.
- [14] 刘金铨. 先进PID控制及其MATLAB仿真 [M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
Liu Jinkun. *Advanced PID control and MATLAB simulation* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [15] 郑浩鑫, 郑宾, 殷云华. 模糊PID数字控制器系统的仿真与设计 [J]. 机械工程与自动化, 2009(2): 121-123.
Zheng Haoxin, Zheng Bin, Yin Yunhua. *Mechanical Engineering & Automation*, 2009(2): 121-123.

(责任编辑 代丽)