

基于分段最优控制的港口自动驾驶液压转向控制算法研究

王阳 赵彬 王占春 郝值 刘新宇

(一汽解放汽车有限公司商用车开发院, 长春 130011)

【欢迎引用】王阳, 赵彬, 王占春, 等. 基于分段最优控制的港口自动驾驶液压转向控制算法研究[J]. 汽车文摘, 2024(1): 51-56.

【Cite this paper】WANG Y, ZHAO B, WANG Z C, et al. Research on Hydraulic Steering Control Algorithm of Port Automatic Driving Based on Segmental Optimal Control[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(1): 51-56.

【摘要】为提高港口场景自动驾驶车辆横向控制准确性, 基于液压转向系统电磁阀的响应特性, 提出了具有分段最优控制的转角闭环控制算法, 实现了车辆单轴、双轴、蟹行转向功能, 通过实车验证对设计的控制算法进行了功能和性能验证。结果表明, 所提出的控制算法能够实现对液压转向系统转角信号快速、稳定跟踪, 能够支撑港口自动驾驶车辆横向控制功能。

关键词: 港口自动驾驶; 液压转向; 分段最优控制; 实车验证

中图分类号: U469.79

文献标识码: A

DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220188

Research on Hydraulic Steering Control Algorithm of Port Automatic Driving Based on Segmental Optimal Control

Wang Yang, Zhao Bin, Wang Zhanchun, HaoZhi, Liu Xinyu

(Commercial Vehicle Development Institute, FAW Jiefang Automobile Co. Ltd, Changchun 130011)

【Abstract】To improve the lateral control accuracy of autonomous vehicles in port scenarios, a closed-loop control algorithm with segmented optimal control is proposed, based on the response characteristics of solenoid valve of hydraulic steering system. The function of single axle steering, double axle steering and crab steering is realized. Moreover, the function and performance of the designed control algorithm have been verified by vehicle validation. The results show that the proposed control algorithm can realize fast and stable tracking of the hydraulic steering signal, and can support the lateral control function of the port autonomous vehicle.

Key words: Port Automatic Driving, Hydraulic Steering Control, Segmental Optimal Control, Vehicle Validation

0 引言

转向系统转角精准控制是实现自动驾驶横向控制的关键, 是实现车辆稳定直线行驶、路径跟踪的基础。因此, 实现高精度的转向控制具有重要意义。

国内外研究机构针对转向系统转角控制已展开了深入研究。张腾飞^[1]设计了基于位置环、速度环、电流环的转向电机位置控制, 应用于自动泊车系统。杜明志等^[2]建立前馈-反馈联合控制系统, 以获得最优的前轮转角。王家炜^[3]设计了终端滑膜控制算法, 保证转向系统的快速响应。程昆朋等^[4]通过比例-积分-微

分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制器实现转角闭环控制, 采用临界灵敏度法整定PID参数, 实现对智能车转向机构的控制。田承伟等^[5]采用前馈型和反馈型四轮转向控制方式, 增强系统抵御外界干扰的能力。王洋洋等^[6]设计了转向系统的滑膜控制算法来实现转角闭环控制, 综合考虑了电机的电磁特性、惯性矩和粘性模型, 转向算法应用于自动驾驶变道系统。在DARPA挑战赛中, 通过纯跟踪算法实现转角控制, 但转向速度慢时控制精度高, 而转向速度快时控制误差较大^[7]。Netto等^[7-9]通过PID控制算法实现转向控制, 并优化不同车速时的控制参数。Alexan-

der等^[10-11]基于最优控制理论设计了转向控制器,即使在外部干扰情况下控制精度很高,但是系统稳定性及鲁棒性仍有待提升。此外,一些先进控制理论,如模糊控制^[12]、免疫算法^[13]、神经网络控制^[14]、模型预测控制^[15]、遗传算法和滑膜控制^[16]也广泛应用到自动驾驶车辆转角控制中。

上述成果多用于电液转向系统,通过算法实现对转向电机的扭矩控制,而自动驾驶港口车采用液压转向系统,通过电磁阀动态控制实现线控转向功能。液压控制核心技术掌握在国际供应商手中,由于液压系统的动态响应特性,常规PID控制算法无法满足转角地精准跟踪。为实现自动驾驶港口车产业化,需突破液压转向控制技术,本文提出基于分段最优控制的转角闭环控制算法,并通过实车验证分段最优控制算法对转角控制的准确性和及时性。

1 液压转向系统

1.1 液压转向系统功能及结构

为实现港口自动驾驶平板车横向控制,液压转向系统应具备全轮转角控制功能,减小转弯半径,满足港口场景灵活作业需求。同时应具备油温监控、压力监控、故障预警等功能,保证液压转向系统正常稳定运行。液压转向系统结构如图1所示。

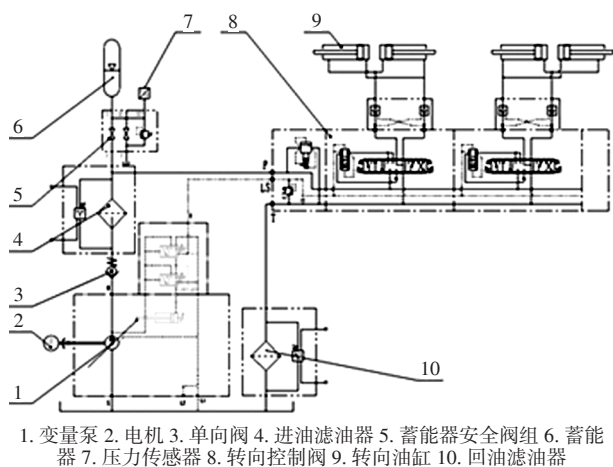


图1 液压转向系统结构

图1中变量泵可以根据转向负载的大小调节变量泵出口的压力,按需提供液压系统所需能量。电机旋转带动变量泵阀芯旋转,保证电机旋转方向与变量泵泵油方向相匹配。单向阀可防止液压油反向流动,进油滤油器滤除从油箱泵入液压油的杂质,蓄能器及安全阀组可实现液压系统储能及限压保护,压力传感器可检测液压系统各个点处的液压压力值,转向控制阀通过控制流入转向油缸中的液压流量,实现转角控

制。转向油缸是转向执行机构,通过液压油推动转向连杆及车轮的转动。回油滤油器滤除液压管路中的杂质,防止杂质进入油箱。

转向系统主要通过转向控制阀实现车轮转角的调节。

1.2 转向控制阀特性

转向控制阀通过脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号占空比调节流过转向控制阀流量大小,图2^[17]为转向控制阀的流量特性曲线,可得到转向控制阀具有如下特性:

(1)当PWM信号占空比小于30%时,无法使转向控制阀阀芯移动,流量为0,无法推动液压缸移动;

(2)当PWM信号占空比为30%~100%时,转向控制阀流量与占空比基本为线性关系。

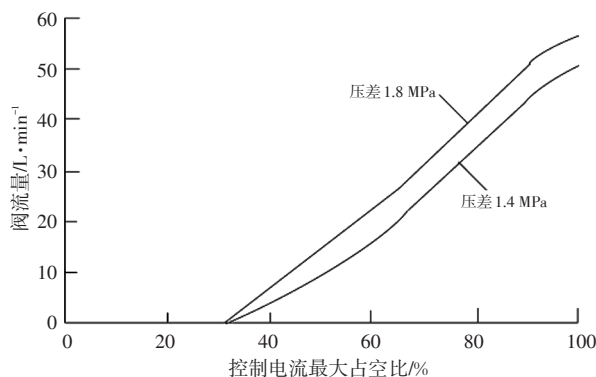


图2 转向比例阀流量特性曲线^[17]

此外,根据流体力学液压冲击现象,当液体流动方向突然改变或停止时,液体流动速度发生急剧变化,由于流动液体的惯性和运动部件的惯性,使系统中的压力在某一瞬间突然急剧上升,形成一个压力峰值,即液压冲击,液压冲击形成的瞬时压力峰值是正常工作压力的3~4倍。

综上,转向控制阀刚开启时,液压流量极小,很难推动转向油缸。转向控制阀关闭时会形成液压冲击,使液压油缸继续向原液压油方向移动,形成液压过冲。转向控制阀在其它位置时,液压流量与占空比成线性关系。

1.3 左右转向轮转角关系

车辆转向时,左右车轮转角关系符合阿克曼转向原理,但车辆在实际运动过程中,由于转向梯形和轮胎侧偏角的关系,实际左右车轮的转角关系并不完全符合阿克曼转向原理。由于港口自动驾驶平板车在低速工况下运行,在不考虑轮胎侧偏角和侧倾刚度的情况下,依据转向梯形可得内外侧车轮转角关系如图3~图4、式(1)~式(2)所示:

(1)当已知内侧车轮转角 α , 求解外侧车轮转角 β :

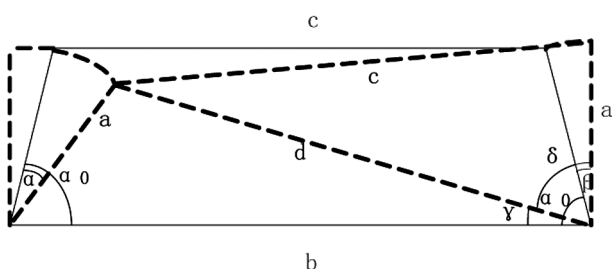


图3 左右车轮转角关系

$$\begin{cases} d^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\alpha_0 - \alpha) \\ c^2 = a^2 + d^2 - 2ad \cos \delta \\ \frac{a}{\sin \gamma} = \frac{d}{\sin(\alpha_0 - \alpha)} \\ \beta = \delta + \gamma - \alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为转向梯形臂长; b 为两转向节间距长; c 为转向横拉杆长; d 为车轮右转向极限位置时, 左侧转向梯形臂与右转向节距, 该长度为求解左右车轮转角关系的辅助线; α_0 为车轮中位时转向梯形臂与左右转向节连线的夹角; γ 为辅助线 d 与辅助线 b 之间的夹角; δ 为辅助线 d 与右转向梯形臂 a 之间的夹角。

(2)当已知外侧车轮转角 β , 求解内侧车轮转角 α :

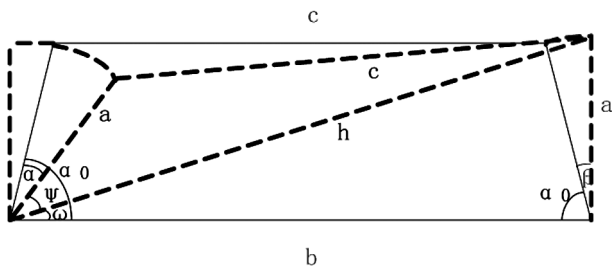


图4 左右车轮转角关系

$$\begin{cases} h^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\alpha_0 + \beta) \\ c^2 = a^2 + h^2 - 2ah \cos \varphi \\ \frac{a}{\sin \omega} = \frac{h}{\sin(\alpha_0 - \beta)} \\ \alpha = \alpha_0 - \varphi - \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 为车轮右转向极限位置时, 右侧转向梯形臂与左转向节距, 该长度为求解左右车轮转角关系的辅助线; ω 为辅助线 h 与 b 之间的夹角; ψ 为辅助线 h 与左转向梯形臂 a 之间的夹角。

通常, 只在一个车轮处安装转角传感器, 通过转角传感器测量得到的实际转角值及式(1)或式(2), 求得同轴另一车轮实际转角。

通过左右车轮实际转角, 可求得单轴、双轴转向时的转弯半径。单轴转向转弯半径:

$$R \approx \frac{L}{\sin \frac{\alpha + \beta}{2}} \quad (3)$$

式中, R 为转弯半径; L 为轴距; α 为转向轴内侧车轮转角; β 为转向轴外侧车轮转角。

双轴转向转弯半径:

$$\begin{aligned} R_1 &\approx \frac{L \cos \frac{\alpha_R + \beta_R}{2}}{\sin \left(\frac{\alpha_F + \beta_F}{2} + \frac{\alpha_R + \beta_R}{2} \right)} \\ R_2 &\approx \frac{L \cos \frac{\alpha_F + \beta_F}{2}}{\sin \left(\frac{\alpha_F + \beta_F}{2} + \frac{\alpha_R + \beta_R}{2} \right)} \\ R &= \max \{ R_1, R_2 \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, R 为整车转弯半径; R_1 为前轴转弯半径; R_2 为后轴转弯半径; L 为轴距; α_F 为前转向轴内侧车轮转角; β_F 为前转向轴外侧车轮转角; α_R 为后转向轴内侧车轮转角; β_R 为后转向轴外侧车轮转角。

通过式(1)至式(4)可求得左右车轮转角及转弯半径, 用于港口自动驾驶平板车横向控制时给出前后轴目标转角。

2 分段最优转角控制器设计

2.1 分段最优控制算法

分段最优控制的思想是基于液压系统的动态特性, 将转向过程划分为多个阶段, 每段选择最优控制算法及控制参数, 使转向过程转角闭环控制最优(图5)。

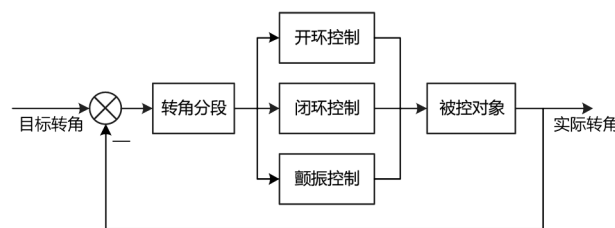


图5 分段最优控制算法结构

根据转向控制阀特性, 将转向控制过程划分为3个阶段:

(1)大转角偏差时, 进行开环控制, 快速响应转向控制阀开启时的响应迟滞。

$$D_{PWM} = C_{OpenLoop} (A_{err} > A_{CalibrationH}) \quad (5)$$

式中, D_{PWM} 为转向控制阀的占空比; $C_{OpenLoop}$ 为开环控制时给出的占空比定值; A_{err} 为目标转角和实际转角的转角误差; $A_{CalibrationH}$ 为试验标定的开环控制转角误差。

当目标转角与实际转角的转角误差大于试验标定的开环转角误差值时,进行转角开环控制,控制器输出给转向控制阀一个固定的占空比。

(2)中转角偏差时,进行闭环控制,精准跟随转角误差。

$$D_{PWM}(t) = K_p \left[A_{err}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t A_{err}(t) dt + T_d \frac{dA_{err}(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

$(A_{CalibrationL} < A_{err} \leq A_{CalibrationH})$

式中, K_p 为比例系数; T_i 为积分系数; T_d 为微分系数; $A_{CalibrationL}$ 为试验标定的闭环控制转角误差下限; $A_{CalibrationH}$ 为试验标定的闭环控制转角误差上限。

当目标转角与实际转角的转角误差处于闭环控制转角误差范围内,进行转角闭环控制,闭环控制采用PID控制算法,控制器输出给转向控制阀随时间变化的占空比。

(3)小转角偏差时,利于颤振控制,防止转向控制结束时液压冲击,并提升下次转向响应时间;

$$D_{PWM} = C_{Filter} (A_{err} \leq A_{CalibrationL}) \quad (7)$$

式中, C_{Filter} 为颤振控制时给出的占空比定值。

当目标转角与实际转角的转角误差小于试验标定的颤振转角误差时,进行颤振控制,控制器输出给转向控制阀一个固定的占空比,使阀芯在转向终位处于一定频率地颤振,防止阀芯完全关闭形成液压冲击,同时提高下次转向过程的启动响应速度。

2.2 转向控制阀左右控制切换逻辑

转向控制阀阀芯可以左右移动,使液压油流入转向油缸的左右腔,从而使车轮进行左转或右转(图6)。

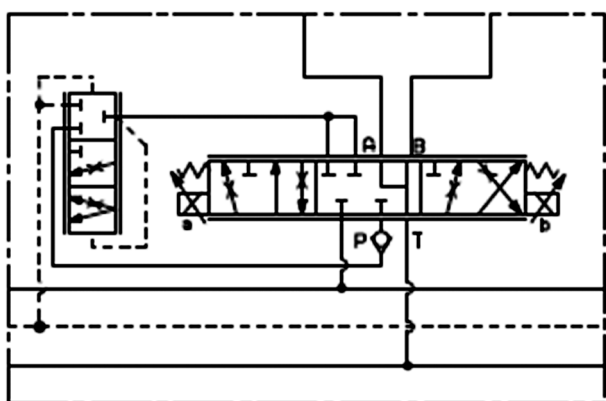


图6 转向控制阀位置

定义车轮转角在中位左侧为负、中位右侧为正。 θ_1 为前轴实际转角, θ_2 为前轴目标转角, θ_3 为后轴实际转角, θ_4 为后轴目标转角。因此,根据前后轴转向时目标转角与实际转角的关系,转向控制阀左右控制切换逻辑如表1。

表1 转向控制阀左右控制切换逻辑

转向模式	前后轴转角关系	前轴转向阀	后轴转向阀
无转向	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0$	零位对中	零位对中
前轴右转向	$\theta_1 < \theta_2 \neq 0; \theta_3 = \theta_4 = 0$	左通道开启	零位对中
前轴左转向	$\theta_1 > \theta_2 \neq 0; \theta_3 = \theta_4 = 0$	右通道开启	零位对中
前轴保持	$\theta_1 = \theta_2 \neq 0; \theta_3 = \theta_4 = 0$	中位保压	零位对中
后轴右转向	$\theta_1 = \theta_2 = 0; \theta_3 < \theta_4 \neq 0$	零位对中	左通道开启
后轴左转向	$\theta_1 = \theta_2 = 0; \theta_3 > \theta_4 \neq 0$	零位对中	右通道开启
后轴保持	$\theta_1 = \theta_2 = 0; \theta_3 = \theta_4 \neq 0$	零位对中	中位保压
蟹行	$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 \neq 0$	中位保压	中位保压
前右转向 后右转向	$\theta_1 < \theta_2; \theta_3 < \theta_4$	左通道开启	左通道开启
前右转向 后左转向	$\theta_1 < \theta_2; \theta_3 > \theta_4$	左通道开启	右通道开启
前右转向 后轮保持	$\theta_1 < \theta_2; \theta_3 = \theta_4$	左通道开启	中位保压
前左转向 后右转向	$\theta_1 > \theta_2; \theta_3 < \theta_4$	右通道开启	左通道开启
前左转向 后左转向	$\theta_1 > \theta_2; \theta_3 > \theta_4$	右通道开启	右通道开启
前左转向 后轮保持	$\theta_1 > \theta_2; \theta_3 = \theta_4$	右通道开启	中位保压
前轮保持 后右转向	$\theta_1 = \theta_2; \theta_3 < \theta_4$	中位保压	左通道开启
前轮保持 后左转向	$\theta_1 = \theta_2; \theta_3 > \theta_4$	中位保压	右通道开启
前轮保持 后轮保持	$\theta_1 = \theta_2; \theta_3 = \theta_4$	中位保压	中位保压

表1中,“零位对中”是指转向控制阀处于零位,转向油缸左右腔液压油均流回油箱,转向轮通过机械自锁使车轮保持在零位,车辆保持直线行驶状态。“中位保压”是指转向控制阀处于中位机能,转向油缸左右腔压力为定值,油缸油腔中既没有液压油流入,也没有液压油流出,转向轮通过液压中位机能保持固定角度,转弯半径固定。“左通道开启”是指转向控制阀阀芯在PWM信号的作用下向左移动,液压油由变量泵流入转向油缸左腔,流量与PWM信号占空比相关,转向油缸右腔的液压油流回油箱,转向轮向右转动。“右通道开启”指转向控制阀阀芯在PWM信号的作用下向右移动,液压油由变量泵流入转向油缸右腔,流量与PWM信号占空比相关,转向油缸左腔的液压油流回油箱,转向轮向左转动。

3 试验验证

3.1 HiL 试验分析

为了验证本文控制算法的有效性,搭建了硬件在环(Hardware in the Loop, HiL)试验平台,如图7所示,

其由RC12-10/30博世力士乐控制器、转向控制阀及转向油缸组成HiL试验环境。

RC12-10/30博世力士乐控制器给出目标转角信号,并采集转向油缸位移,并运行转向控制算法。上位机通过CAN设备与RC12-10/30连接,主要完成模型的下载及参数标定,通过CAN总线与RC12-10/30控制器进行数据交互。

HiL试验设计转向阶跃工况,对提出的分段最优控制算法的跟踪能力进行验证。在转向油缸空载条件下,被试转向控制阀P油口通以额定压力和额定流量,给控制器输入期望油缸位移阶跃信号,采集油缸实际位移曲线,判断转向系统的相应特性。

由图7可知,转向油缸回缩时,位置跟踪误差0.5%,转向油缸外伸时,位置跟踪误差0.85%,说明了分段最优控制算法的有效性。

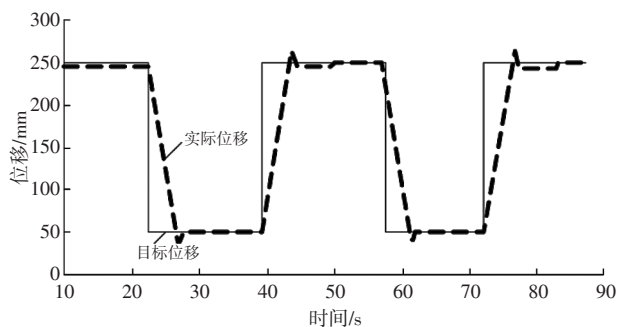


图7 阶跃响应油缸位移曲线

3.2 实车试验分析

为了验证算法在实车上的跟踪效果,在4×4港口自动驾驶平板车上进行验证,如图8所示,其由RC12-10/30博世力士乐控制器、转向控制阀、转向油缸和转角传感器组成实车试验环境。



图8 实车试验验证平台

试验要求车辆能够跟随转角指令进行转向,并反馈实际转角,试验车辆的转向响应精度应在 $\pm 1^\circ$ 范围内,试验车辆从接收到转向指令开始,到车轮开始转向,时间不超过200 ms。

(1) 工况1阶跃转角跟踪能力验证

在车辆静止情况下,以 2° 的阶跃变化验证算法的跟踪效果,对车辆前轴给出目标转角,验证结果如图9

所示。

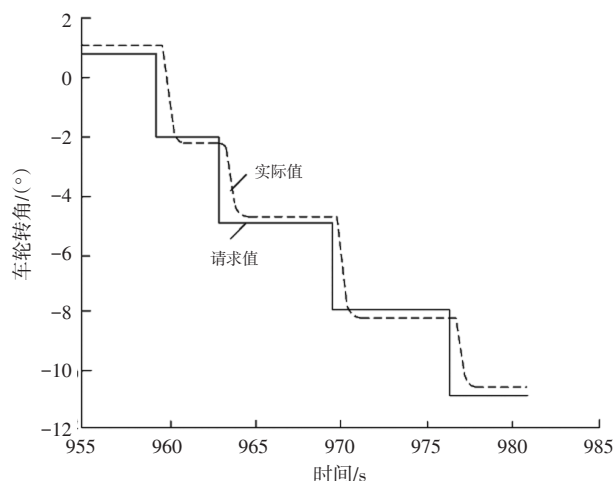


图9 前轴阶跃转向试验

由图9可知,前轴阶跃转向的超调和稳态误差较小,转向响应精度为 0.3° ,转向响应时间为140 ms。

(2) 工况2正弦转角跟踪能力验证

在车辆静止情况下,以周期为40 s,幅值为 30° 的正弦目标转角信号验证算法的跟踪效果,对车辆后轴给出目标转角,验证结果如图10所示。

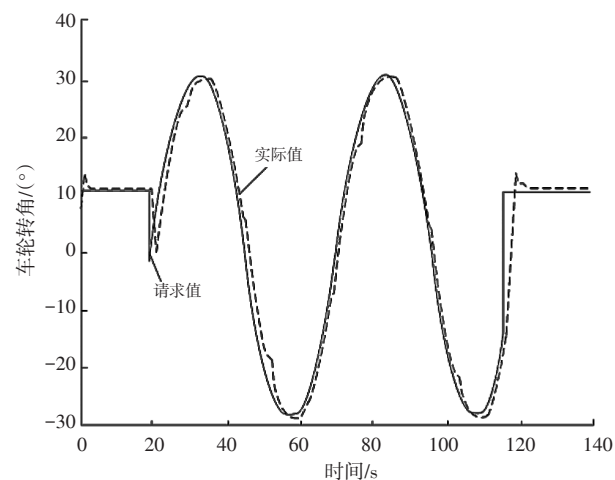


图10 后轴正弦转向测试

由图10可知,后轴正弦转向的超调和稳态误差较小,转向响应精度为 0.4° ,转向响应时间为150 ms,这说明本文的控制算法能够精准实现转角跟踪。

4 结论

本文提出了基于液压转向系统电磁阀响应特性的转角分段最优控制算法,将转向过程划分为开环控制、闭环控制和颤振控制,有效解决了转向控制阀控制死区和液压冲击的问题,实现了转角的精准控制。通过硬件在环及实车验证可以得到以下结论:

(1)本文的控制算法对于液压转向的控制具有较好的适应能力,从而实现对转角信号快速、稳定地跟踪。

(2)在车辆转向系统模型未准确建模状态下,本文的算法可以对转角进行有效控制,且具有较强的鲁棒性。

未来可通过台架试验,获取不同电磁阀响应特性曲线,进行自适应分段最优控制,进一步降低响应时间并提高控制精度。

参 考 文 献

- [1] 张腾飞. 面向自动泊车应用的转向盘位置跟随控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [2] 杜明志, 孙跃东. 线控转向系统前轮主动转向控制策略研究[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(17): 38-43.
- [3] 王家炜. 线控转向车辆的转向感反馈控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [4] 程昆朋, 张效宇, 赵祥磊, 等. 智能汽车转向机构转角闭环控制方法[J]. 上海汽车, 2019(11): 41-43+52.
- [5] 田承伟, 宗长富, 何磊, 等. 汽车线控四轮转向控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5): 1177-1182.
- [6] WANG Y, CHEN G, AO X, et al. Precise Steering Angle Control of Lane Change Assist System[J/OL]. SAE Technical Paper, (2017-09-23)[2023-01-05]. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2002>.
- [7] 陈慧岩, 熊光明, 龚建伟, 等. 无人驾驶汽车概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [8] NETTO M, BLOSSEVILLE J M, LUSETTI B, et al. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvatures[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, IEEE, 2006: 1382-1387.
- [9] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [10] KATRINIOK A, MASCHUW J P, CHRISTEN F, et al. Optimal vehicle dynamics control for combined longitudinal and lateral autonomous vehicle guidance[C]//Control Conference, Zurich, Switzerland, IEEE, 2013: 974-979.
- [11] 马莹, 李克强, 高峰, 等. 改进的有限时间最优预瞄横向控制器设计[J]. 汽车工程, 2006, 28(5): 433-438.
- [12] GUO J, LI L, LI K, et al. An adaptive fuzzy-sliding lateral control strategy of automated vehicles based on vision navigation[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(10): 1502-1517.
- [13] LAN Y T, HUANG J Y, CHEN X D, et al. Research on intelligent vehicle path planning based on artificial immune network algorithm[J]. Journal of information and computational science, 2015, 12(16): 6023-6032.
- [14] IKBAL E, ALI T. Design of neural network-based control systems for active steering system[J]. Nonlinear dynamics, 2013, 73(3): 1443-1454.
- [15] ERKAN K, HERMAN R, WOUTER S. Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics: A joint publication of the IEEE Industrial Electronics Society and the ASME Dynamic Systems and Control Division, 2016, 21(2): 806-814.
- [16] WU S J, ZHU E Y, QIN M, et al. Control of four-wheel-steering vehicle using GA fuzzy neural network[C]//2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China: ICICTA, 2008: 869-873.
- [17] BOSCH REXROTH A G. RE 18301-15/06[EB/OL]. (2018-06)[2022-12-30]. www.boschrexroth.com/compact-hydraulics.

(责任编辑 姜明慧)

【作者简介】

王阳, (1991—), 女, 就职于一汽解放商用车开发院, 研究方向为车辆控制。

E-mail: wangyang@rdc.faw.com.cn