

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.049

基于快速控制原型的汽车线控转向控制器研究

蒋明朝¹, LIU Henke², 唐阳¹, 张鑫¹, 曾贵萍¹

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610036; 2. 德国 Ostfalia 应用科学大学, 德国 沃分比特)

摘要:为了提高线性转向控制系统控制性能以及控制系统的快速性、准确性、稳定性, 基于快速控制原型技术搭建 RCP 测试平台, 对比不同控制策略对线性转向系统控制性能的影响。通过建立执行电机的数学模型, 依据其动态特性逐步设计优化 PD 控制器、串级三闭环 PID 控制器以及模糊 PID 控制器, 分析 3 种控制器的阶跃响应性能。基于 dSPACE 设计搭建 RCP 快速原型控制测试平台, 分别对控制器的跟随性能进行半实物仿真实验, 对比分析控制器的性能优劣。半实物仿真实验结果表明: 模糊 PID 控制策略在转角跟随性能控制中更为优异。

关键词:汽车; 线控转向; 模糊 PID; 半实物仿真

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0229-05

Research on Automotive Wire-controlled Steering Controller Based on Rapid Control Prototype

JIANG Mingchao¹, LIU Henke², TANG Yang¹, ZHANG Xin¹, ZENG Guiping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036, China;

2. Ostfalia University of Applied Sciences, Wofenbuetel, Germany)

Abstract: In order to improve the control performance of linear steering control system with rapidity, accuracy and stability, this paper builds a RCP test platform based on the rapid control prototype technology, and compares the effects of different control strategies on the control performance of the linear steering system. With the establishment of the mathematical model of the executive motor, the PD controller, cascade three closed loop PID controller and fuzzy PID controller are gradually designed and optimized according to their dynamic characteristics, and the step response performance of the three controllers is analyzed. The RCP rapid prototype control test platform is built based on dSPACE design, the following performance of the controller is tested in semi-physical simulation and the performance advantages and disadvantages of the controller are compared and analyzed. The results show that the fuzzy PID control strategy is superior in the control of corner following performance.

Keywords: car; linear steering; fuzzy PID; semi-physical simulation

0 引言

汽车线控转向系统是在传统转向系统基础上逐渐改进而来的, 是由控制器根据采集到的转角及车辆状态信息, 经过控制算法控制前轮执行电机输出合适的转角, 从而控制车辆行驶方向, 因此能够实现方向盘与车轮之间的解耦^[1]。这种技术在很大程度上改善了操纵性能并且提升了驾驶的舒适性^[2]。

目前针对线性转向系统的控制研究多基于仿真分析, 并且在仿真层面提出并验证了多种具有较好效果的控制策略, 但真实的被控对象受多种因素影响, 因此这些控制策略还需要实物试验的验证^[3]。

现有的实物验证控制器开发过多依赖于嵌入式软件, 而这种控制方法的缺点在于开发周期长、

成本较高。本文基于 dSPACE 控制平台并引入 RCP 技术(RCP 技术被广泛应用于控制器开发初期)可以更有效地验证控制策略的可行性, 调整控制器参数, 从而缩短开发周期, 提高开发效率, 节省开发成本。利用 RCP 技术实时性高的特点, 在不需要开发控制器硬件的前提下对真实的被控对象实现对控制策略的快速验证, 有助于在短时间内实现对多种控制策略的验证^[4]。

1 半实物仿真试验平台的设计

本文设计的 RCP 测试平台选用的控制设备为 dSPACE 1104, 基于项目支持, 由德方设计并搭建了快速响应控制试验平台^[5]。主要由实物层、信号接口层、实时仿真层以及人机交互层 4 部分

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2019YFH0045)

第一作者简介: 蒋明朝(1997—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为主动导向控制, jc152724@126.com。

构成^[6],如图1所示。

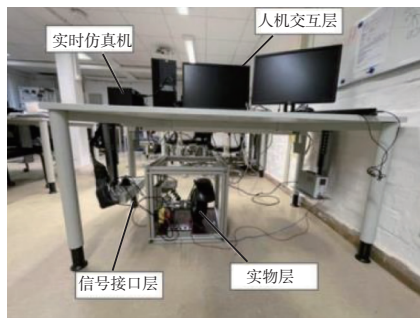


图1 RCP测试平台

1.1 线控转向试验台

线控转向执行机构试验台如图2所示,可分为3个部分:一是转向驱动部分(执行电机);二是由转向节、横拉杆、转向臂和下摆臂组成的转向执行结构,传动机构类型为曲柄摇杆机构。执行电机受控产生驱动力矩通过转向执行机构将驱动力矩传递到车轮完成指定转向动作;三是转向车轮。转向执行机构由转向臂(曲柄)、横拉杆(连杆)、转向节(摇杆)和下摆臂构成,即执行电机通过对转向臂施加力矩驱动车轮摆动。

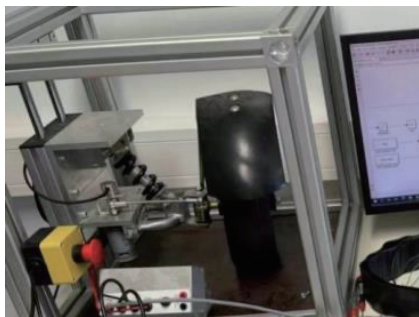


图2 执行部分局部细节

1.2 信号接口与dSPACE

dSPACE 1104 单板系统提供符合工业标准的各种接口^[7],包括 A/D 和 D/A 转换接口、Digital I/O、Slave PWM I/O、增量编码器接口、RS232 和 RS485 通信接口。表1是试验台所使用到的接口及其相应的功能。

表1 dSPACE 信号接口

信号通道	功能
ADC	将模拟量转化为数字量
DAC	将数字量转化为模拟量
Slave I/O PWM	输出指定频率及占空比的方波信号
Lnc1、Lnc2	计算采样时间内高电平脉冲数

本试验台选用 RB-35 永磁直流电机作为执行电机,选用 RN-VNH2 调速器作为电机驱动器。驱动器接收幅值为 5 V 的 PWM 脉冲信号,通过调节 PWM 方波信号的占空比实现速度的调节,通过给定高低电平实现方向的调节。另外,该驱动器配备温度检测功能,通过一个输出接口输出模拟电压与控制板温度形成线性关系检测控制板温度。

试验台反馈信号使用编码器检测,选用库伯勒 1024 线数型增量式编码器 dSPACE 1104 的编码器接口可以采集 TTL 或者 RS422 输出信号,分别以采集总脉冲数以及采样时间脉冲数的形式输出。

1.3 执行电机的等效数学模型的建立

对执行电机的数学模型进行推算,其中电枢回路电压方程为

$$U_a R_a + L_a \frac{d i_a}{d t} + E \quad (1)$$

感应电动势为

$$E = K_e \times n \quad (2)$$

在空载状态下,转子机械动力学方程为

$$T_e = J \frac{d n}{d t} \quad (3)$$

电机输出转矩为

$$T_e = K_t \times i_a \quad (4)$$

式中: K_t 为电机转矩常数; K_e 为电机电压常数; J 为电机转子转动惯量。

经过拉普拉斯变化并带入电机相应参数,依次算出电机输入电压与其输出转速、输出转角以及输出电流的传递函数,如式(5)~式(7)所示。

$$G_n = \frac{N(s)}{U_a(s)} = \frac{21.98}{0.000\ 253s^2 + 0.062\ 7s + 1} \quad (5)$$

$$G_\alpha = \frac{\alpha(s)}{U_a(s)} = \frac{21.98}{0.000\ 253s^3 + 0.062\ 7s^2 + s} \quad (6)$$

$$G_i = \frac{I(s)}{U_a(s)} = \frac{0.197s}{0.000\ 253s^2 + 0.062\ 7s + 1} \quad (7)$$

2 控制器设计

PID 控制是现今应用最广泛的控制策略之一。PID 控制具有如下优点:1)工作原理较为简单,使用比较方便,可以及时设置 PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 和 K_d ;2)适应性及鲁棒性较强,可改善系统的静态特性。

本文根据输入电压与各输出之间的传递函

数,确定本系统设计的目标首先要保证输出稳定,其次具有较好的动态性能以及稳态性能。由此,控制目标设定为在不超过 5% 超调量的前提下尽可能地减少上升时间。

2.1 单闭环 PD 控制器设计

PID 控制器的输入是理想输出值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 之间的误差 $e(t)$,将误差经过比例、积分、微分环节后得到执行电机的输出 $u(t)$ 。

其中控制器的输入即偏差为

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (8)$$

控制器的输出为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

不同的比例、积分和微分系数对系统性能有不同的影响。其中 PID 参数整定基本上有两种方法:一是理论计算整定法,即根据系统的传递函数和设计目标,通过已有的公式反算确定 PID 控制器的参数。然而该方法较为复杂,并且对系统传递函数的精度要求较高,因此本文不使用该方法;二是工程整定方法,这种方法更多基于工程经验,不需要仿真而在实验中测试,该方法简单实用,使用步骤较为明了,从而在工程实践中得到大量的应用。控制工程中常用的技术整定方法包括临界比例度法和 ISTE 最优参数整定方法等。

本文使用 Ziegler 和 Nichols 提出的临界比例度法进行 PID 控制器参数整定^[8]。根据整定结果确定积分参数为 0 的 PD 控制器,在 Simulink 中搭建输入电压与输出转角的控制系统并进行单位

阶跃相应仿真。为更好地对比控制器性能,依据控制器的设计目标在区间范围内对参数进行微调,得到阶跃响应性能对比如图 3 所示。

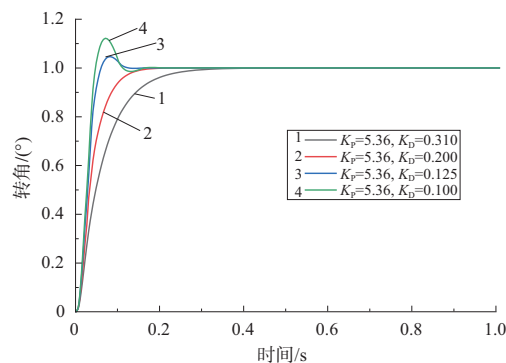


图 3 单闭环 PD 控制器阶跃响应

从 4 种参数选定的控制器性能分析中发现,当选择 $K_p = 5.36$, $K_d = 0.125$ 时,超调量为 4.7%,上升时间为 0.041 s,因此选 $K_p = 5.36$, $K_d = 0.125$ 作为单闭环 PD 控制器设计结果。

2.2 串级三闭环 PID 控制

为了提高响应性能,尝试从内到外设计串级三闭环 PID 控制策略,即电流环、速度环和位置环。

串级三闭环控制系统的设计特点及优点是系统的主故障输入包含在内环中,具有超前控制功能,能有效抑制干扰并尽可能提高响应速度。与单闭环 PD 控制系统相比,串级三闭环控制系统具有更高的工作频率、更小的振动周期、更短的调节时间和更快的响应速度。串级三闭环 PID 控制系统如图 4 所示。

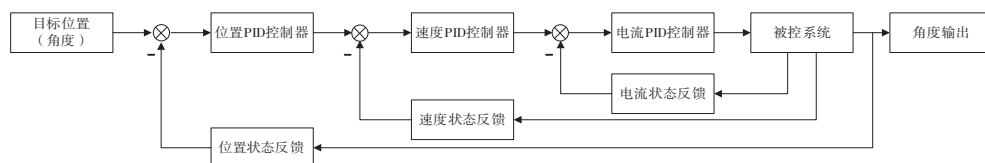


图 4 串级三闭环 PID 控制器结构

依据临界比例法分别对电流环、速度环、位置环的子控制器进行 PID 参数整定,选定各子环参数并在区间内进行微调,对比阶跃响应性能如图 5 所示,图例中 [236 0 6; 0.3; 0.11 6] 代表位置环 PID 控制参数 $K_p = 236$ 、 $K_i = 0$ 、 $K_d = 6$;速度环 P 控制参数 $K_p = 0.3$;电流环 PI 控制参数 $K_p = 0.11$ 、 $K_i = 6$ 。

对比 4 组选定的 PID 参数,保证超调量满足需求的情况下,选择电流环 $K_p = 0.11$ 、 $K_i = 6$;速度环 $K_p = 0.3$;位置环 $K_p = 236$ 、 $K_d = 6$ 时,上升时间

为 0.031 s,超调量为 4.4%。以此作为串级三闭环 PID 控制策略的设计结果。

2.3 模糊 PID 控制

串级三闭环控制策略的参数设置过程复杂。为了改善误差并试图进一步提高系统响应性能,基于串级三闭环 PID 控制器,在最外环上增加了模糊自适应 PID 控制策略。

模糊控制器的基本工作原理是将误差信号 e 作为模糊控制器的输入语言变量,误差 e 经过模

糊后,得到模糊集 E ,由 E 和模糊控制规则得到模糊控制变量 U ,再经过模糊决策、清晰化后输出精确的控制量 u 来控制被控对象^[9]。本文使用二维模糊控制器,将执行电机的实际转动角度与理想角度之间的偏差和及其变化率作为模糊控制器的两个输入变量,并将比例、积分和微分系数的增量作为输出。模糊 PID 的阶跃响应曲线如图 6 所示。可以看到,模糊 PID 控制器系统阶跃响应超调量是 1.5%,上升时间是 0.029 s,相较于串级三闭环的上升时间有所减小。

为了分析单闭环 PD 控制策略、串级三闭环

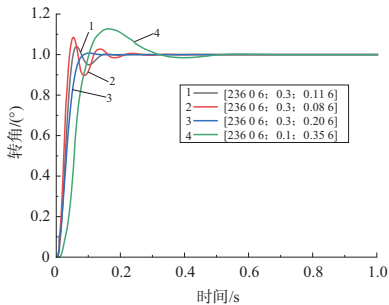


图 5 串级三闭环 PID 控制器阶跃响应

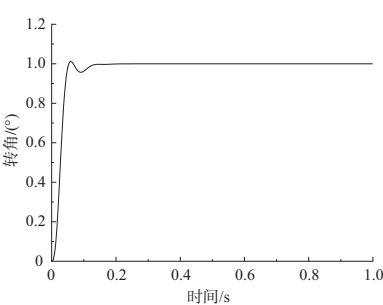


图 6 模糊 PID 控制器阶跃响应

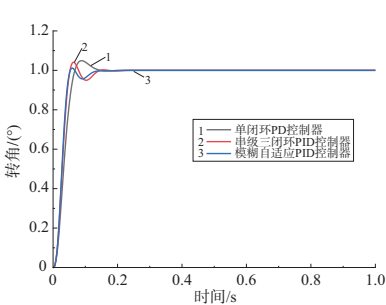


图 7 3 种控制策略阶跃响应仿真对比

控制策略的阶跃响应仿真结果表明:把超调量控制在大约 5%时,串级三闭环 PID 控制策略的上升时间较单闭环 PD 控制策略的上升时间降低了 24.39%;模糊自适应 PID 控制策略的上升时间较串级三闭环 PID 控制策略的上升时间降低了 6.45%。

3 半实物仿真试验

由于仿真测试的局限性,所以本文基于设计的线控转向转角跟踪控制策略 RCP 测试平台对上文提出的控制器进行半实物仿真试验。

3.1 RCP 测试模型搭建

考虑到线控转向系统的实际用途,所以在半实物仿真试验阶段主要对 3 种控制器的跟随性能

PID 控制策略和模糊自适应 PID 控制策略的阶跃响应结果,3 种控制策略仿真调试获得相对较优参数的阶跃响应曲线对比如图 7 所示,结果对比如表 2 所示。

表 2 控制策略阶跃响应仿真结果对比

控制器	上升时间/s	超调量/%
单闭环 PD 控制器	0.041	4.7
串级三闭环 PID 控制器	0.031	4.4
模糊自适应 PID 控制器	0.029	1.5

进行测试对比。因此设置 3 种不同幅值和频率的正弦波用以作为跟随性能测试的信号输入,3 种信号如表 3 所示。

表 3 控制策略跟随性能测试工况表

工况	幅值/(°)	频率/Hz
1	5	0.5
2	5	1.0
3	10	1.0

在 Simulink 中搭建控制逻辑图并编译,利用 ControlDesk 软件可将编译的代码烧录到控制板之中。测试模型如图 8 所示。

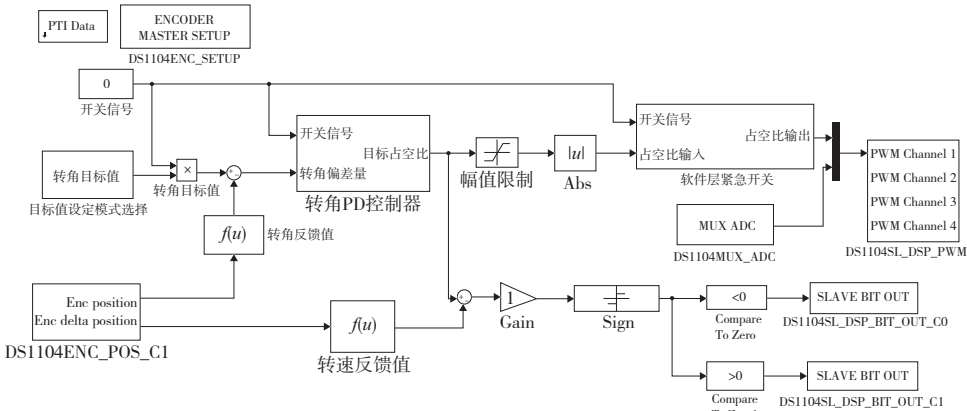


图 8 RCP 测试模型

3.2 跟随性能误差对比

将3种控制器在不同工况下的跟随性能误差作为评判指标进行整理,得到跟随误差如图9所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

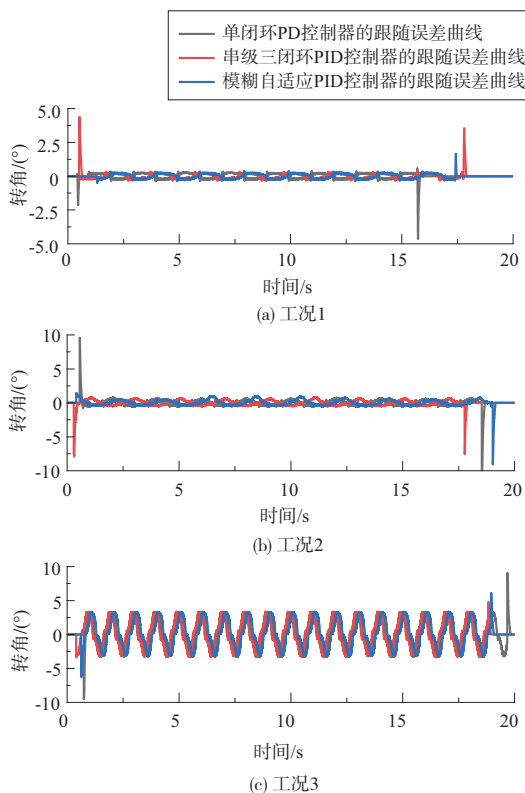


图9 控制器跟随性能误差对比

从跟随性能误差曲线可以看出,在低频率低幅值的工况中,3种控制器误差都相对较小,但单闭环控制以及串级三闭环PID控制器在起始以及截止时刻都存在较大的跟随误差。在高频高幅值的工况下,3种控制器均存在较大的滞后与误差。

为进一步量化3种控制器跟随性能,对3种控制器在3种工况下的误差取散点的方均根,得到每种控制器在3个工况下的方均根误差均值如表4所示。对比表明,模糊PID控制器在跟随性能中是最优的。

表4 控制器跟随方均根误差

控制策略	3种工况的RMSE均值/(°)	相较于PD提升率/%
单环PD控制	1.22	—
串级PID控制	0.78	36.07
模糊PID控制	0.70	40.26

4 结语

利用实验室已有的半实物仿真平台,对线控转向技术的控制策略做了逐步优化。利用临界比例度法对PID控制器参数进行整定,依次选用单闭环PD控制器、串级闭环控制器、模糊控制器对转角的阶跃响应性能进行了评判,利用dSPACE结合Simulink进行半实物仿真试验,对各种控制策略的跟随性能进行了进一步评判。仿真及试验结果证明,模糊控制器在线控转向技术中作为控制器最为优越。

参考文献:

- [1] 宗长富,李刚,郑宏宇,等. 线控汽车底盘控制技术研究进展及展望[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 160-176.
- [2] MORTAZAVIZADEH S A, GHADERI A, EBRAHIMI M, et al. Recent developments in the vehicle steer-by-wire system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1226-1235.
- [3] 徐威,苏东海. 基于Linux的液压伺服系统半实物仿真方法研究[J]. 机械与电子, 2022, 40(8): 3-7, 13.
- [4] PARK T J, OH S W, JANG J H, et al. The design of a controller for the steer-by-wire system using the hardware-in-the-loop-simulation system[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2002.
- [5] 杨兴超,陈卓,冯谨涛. 基于V型开发模式光伏模拟器MPPT控制研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(1): 138-140.
- [6] 张鑫. 基于快速控制原型的汽车线控转向转角跟踪控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- [7] 张新丰,陈慧,孟宗良,等. 控制器V型开发模式实验教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(2): 131-134.
- [8] 刘冰琪,解初,刘鹏. PID控制器最优参数整定方法的研究[J]. 科技风, 2022(19): 1-3.
- [9] 陈李成,谢振宇,郝建胜,等. 磁气组合轴承的模糊PID控制算法设计[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 143-147.

收稿日期:2022-11-01