

车辆线控转向系统的分数阶鲁棒控制研究*

田杰¹ 陈宁² 高翔³

(1. 南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037) (2. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

(3. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要 线控转向系统有别于普通车辆的机械转向机构, 它是由转向电机、转向机构、转角和力矩传感器以及控制单元构成的复杂转向系统. 系统性能受到参数的不确定性、未建模动态以及前轮回正力矩的影响. 本文基于分数微积分理论, 根据转向系统鲁棒性的设计要求, 提出一种新的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制策略, 保证线控转向系统在所要求的频域范围具有鲁棒性. 文中通过优化方法得到 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的五个设计参数, 并用 Oustaloup 算法对分数阶控制器进行仿真验证, 结果表明该控制方法对提高转向系统性能的鲁棒性是有效的.

关键词 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器, 线控转向系统, Oustaloup 算法, 鲁棒控制

引言

为了在驾驶员正常驾驶过程中提高车辆的操纵性能, 车辆线控转向技术近年来受到许多企业和研究学者的关注. 线控转向系统可以实现在驾驶员正常操作车辆的同时根据车辆的运动状况和稳定性对前轮转向角度进行修正达到提高性能的目的. 因而转向系统有别于普通车辆的机械操纵机构, 而是由转向电机、转向机构、转角和力矩传感器以及控制单元构成的复杂转向系统. 由于车辆转向系统中受到参数的不确定性、未建模动态以及前轮回正力矩的影响, 一般的控制方法难以对性能进行保证.

PID 控制器由于它具有较强的鲁棒性, 能够在较大范围内适应不同的工作条件, 同时又简单易用, 因此得到了广泛的应用. 常规的 PID 控制器的微分和积分都是整数阶的, 对其的研究也比较深入^[1]. 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器是整数阶 PID 控制器概念的推广. 因为无论是积分器的阶次, 还是微分器的阶次都可以不是整数, 所以分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器比整数阶 PID 控制器多 2 个自由度: 积分器和微分器的阶次, 因而它更具有灵活性.

1 车辆线控转向系统的结构和工作原理

车辆线控转向系统主要由转向盘模块、控制器模块和前轮转向模块三部分组成, 如图 1 所示. 其

中转向盘模块的主要功能是将驾驶员的转向意图传给控制器, 并为驾驶员提供相应的路感. 主要包括转向盘、回正电机及减速器、回正电机电流传感器、转向盘转矩和转角传感器. 前轮转向模块的功能是实现驾驶员的转向意图. 主要包括前轮转向机构、转向电机及减速器、转向电机电流传感器以及齿条位移传感器.

当驾驶员转动转向盘时, 控制器根据采集到的转向盘转角信号和车速信号, 由前轮转角算法计算出理想的前轮转角, 控制转向电机转动以驱动前轮转过相应的角度; 同时, 控制器还会根据转向盘回正力矩算法计算出转向盘回正力矩, 控制回正电机的转动, 为驾驶员提供适应的路感.

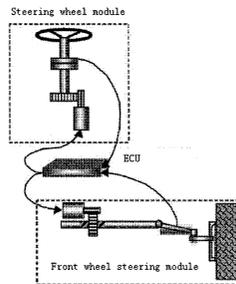


图 1 线控转向系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the steering-by-wire system

2 前轮转向模块

前轮转向模块动力学模型如图 2 所示. 其中

T_m, J_m, δ_m, B_m 分别是转向电机的电磁转矩、转动惯量、转角和粘性摩擦系数;转向电机的减速比为 G ; J_s, δ_s, B_s 分别是前轮及转向机构向小齿轮轴等效后的转动惯量、前轮等效到小齿轮轴的转角、等效到小齿轮轴的前轮及转向机构的粘性摩擦系数;电动机作用到小齿轮轴的力矩为 T_a ;等效到小齿轮轴的转向阻力矩为 T_r .

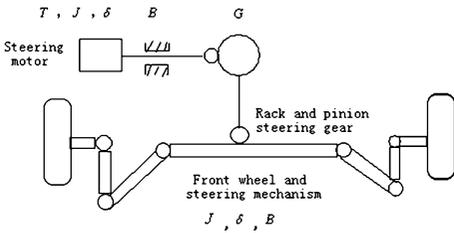


图2 前轮转向模块动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of the front wheel steering module

①转向电机机械特性模型

$$T_m - \frac{T_a}{G} = J_m \ddot{\delta}_m + B_m \dot{\delta}_m \quad (1)$$

其中, $T_m = k_t i_a, k_t, i_a$ 分别是转向电机的电磁转矩常数和电流。

②转向电机电器特性模型

$$U_a = R i_a + L \dot{i}_a + k_e \dot{\delta}_m \quad (2)$$

其中, R, L, k_e 分别是转向电机的电枢电阻、电感和反电动势。

③前轮及转向机构模型

$$T_a - T_r = J_s \ddot{\delta}_s + B_s \dot{\delta}_s \quad (3)$$

另外,由于不考虑转向电机的扭转刚度,考虑转向电机与小齿轮轴之间的速度匹配,故有 $\delta_m = G \delta_s$ 。

对以上的前轮转向模块动力学模型进行拉式变换,并且忽略 T_r ,即可得到以下的传递函数:

$$G(s) = \frac{\delta_s(s)}{U_a(s)} = \frac{G k_t}{(Ls + R)[(G^2 J_m + J_c)s^2 + (G^2 B_m + B_c)s] + G^2 k_e k_t s} \quad (4)$$

3 分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器

考虑到整数阶 PID 控制器的传递函数描述为^[1]

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (5)$$

其中, $U(s)$ 为控制器的输出; $E(s)$ 为控制器的误差输入。把式(5)微分和积分的阶次推广到分数,可以得到分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的传递函数^[2]为

$$G_{cf}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (6)$$

显然,当 $\lambda = \mu = 1$ 时, $G_{cf}(s)$ 为整数阶 PID 控制器;当 $\lambda = 0, \mu = 1$ 时, $G_{cf}(s)$ 为整数阶 PD 控制器;当 $\lambda = 1, \mu = 0$ 时, $G_{cf}(s)$ 为整数阶 PI 控制器。

带有分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的系统结构图如图3所示,其中 $\delta(s)$ 为参考输入, $E(s)$ 为误差, $G(s)$ 为被控对象传递函数。

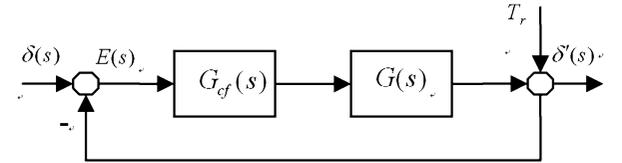


图3 带有分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的系统结构图

Fig. 3 System structure with fractional $PI^\lambda D^\mu$ controller

Monje 等在文献[3]中给出 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器参数调节的一些规则,即控制器的传递函数 $G_{cf}(s)$ 使系统函数 $G(s)$ 满足以下5项条件:

- ①按系统要求确定开环系统的穿越频率 ω_{cg} ,使得

$$|G_{cf} \omega_{cg} G(\omega_{cg})| = 0 \text{ dB} \quad (7)$$
- ②按要求给於一定的相位裕量 φ_m

$$-\pi + \varphi_m = \arg |G_{cf} \omega_{cg} G(\omega_{cg})| \quad (8)$$
- ③为了抑止高频噪声,则闭环传递函数在高频段应只有较小的幅值。因此,要求在某一设定的高频 ω_h 处,其增益应小于设定的 H 值。

$$\left| \frac{G_{cf} \omega_h G(\omega_h)}{1 + G_{cf}(\omega_h) G(\omega_h)} \right| < N \quad (9)$$

- ④灵敏度函数在低频段应具有较小的幅值,以抑止输出干扰和较好地跟踪参考信号。因此,在设定的低频 ω_l 处,其幅值应小于设定的 N 值。

$$\left| \frac{1}{1 + G_{cf}(\omega_l) G(\omega_l)} \right| < N \quad (10)$$

- ⑤为保证系统在被控对象参数发生变化时具有良好的鲁棒性,系统开环传递函数的相位在穿越频率附近应为一常数。

$$\frac{d}{d\omega} \arg |G_{cf} \omega_{cg} G(\omega_{cg})| = 0 \quad (11)$$

只要把方程(7)为优化目标函数,而条件(8)~(11)为约束条件,利用优化算法求目标函数的极小值,便可确定控制器的5个参数,即比例系数 K_p 、积分阶次 λ 、积分系数 K_I 、微分阶次 μ 和微分系数 K_D 。

4 仿真分析

4.1 分数阶系统的数字仿真

目前,分数阶系统还不能直接在 MATLAB、Adams 等常见的仿真系统进行仿真,通常用一性质近似的高阶系统来近似替代,Oustaloup 近似算法是被最常用的方法,其具体计算过程^[4]如下:

设选定拟合的频域为 $\omega_a \sim \omega_b$,则分数阶微积分的拉普拉斯算子可用下面近似的高阶系统代替:

$$s^\nu \cong K \prod_{i=-N}^N \frac{1+s/\omega_i}{1+s/\omega'_i} \quad (12)$$

当 $\nu > 0$ 时为导算子, $\nu < 0$ 时为积分算子.其中,零极点 ω_i 、 ω'_i 和增益 K 可用下式求出.

$$\omega_i = \omega_a \left(\frac{\omega_b}{\omega_a} \right)^{\frac{i+N+0.5(1+\nu)}{2N+1}}, \omega'_i = \omega_a \left(\frac{\omega_b}{\omega_a} \right)^{\frac{i+N+0.5(1+\nu)}{2N+1}},$$

$$K = \left(\frac{\omega_b}{\omega_a} \right)^{-\frac{\nu}{2}} \prod_{i=-N}^N \frac{\omega_i}{\omega'_i} \quad (13)$$

根据上述算法,可直接求出逼近分数阶系统的高阶整数系统.由于 Oustaloup 算法本身的局限性,应选取 $\omega_a \omega_b = 1$.

4.2 系统的仿真

仿真系统结构图如图 3 所示.仿真中用到的参数如下: $k_t = 0.086 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, $L = 0.003 \text{ H}$, $J_m = 0.006 \text{ kg}/\text{m}^2$, $J_s = 0.01 \text{ kg}/\text{m}^2$, $B_m = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $R = 0.34 \Omega$, $G = 20$, $B_s = 0.3 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $k_e = 0.009 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$.则被控对象的传递函数(4)可改写成

$$G(s) = \frac{1}{0.0042s^3 + 0.48s^2 + 1.03s} \quad (14)$$

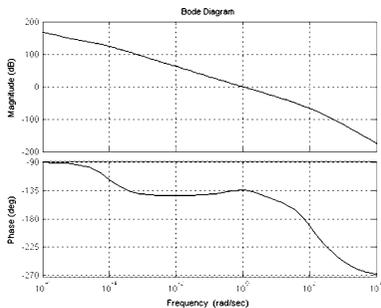


图 4 开环系统 bode 图

Fig. 4 Bode of open loop system

控制器设计过程中用到的参数为: $\omega_{cg} = 0.99 \text{ rad}/\text{s}$, $\omega_l = 0.001 \text{ rad}/\text{s}$, $\omega_h = 100 \text{ rad}/\text{s}$, $\varphi_m = 45.9^\circ$, $H = -10 \text{ dB}$, $N = -20 \text{ dB}$.采用优化计算得到 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器传递函数为

$$G_{cf}(s) = 0.182 + \frac{0.7973}{s^{-0.6029}} + 0.4994s^{0.3858} \quad (15)$$

系统的开环、闭环 bode 图分别如图 4 和图 5 所示.

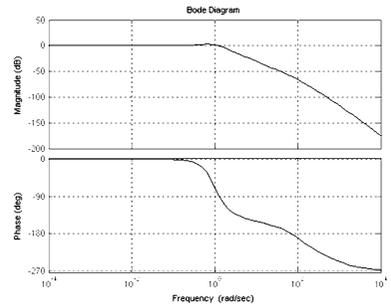


图 5 闭环系统 bode 图

Fig. 5 Bode of closed loop system

当线控转向系统的参数发生变化时,采用常规 PID 控制的系统所对应的阶跃响应如图 6 所示, $PI^\lambda D^\mu$ 控制的系统所对应的阶跃响应如图 7 所示.

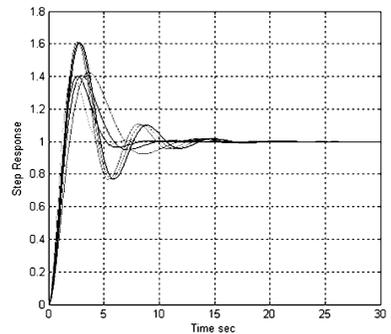


图 6 参数变化时,常规 PID 的系统阶跃响应

Fig. 6 System step response of PID controller with the change of parameters

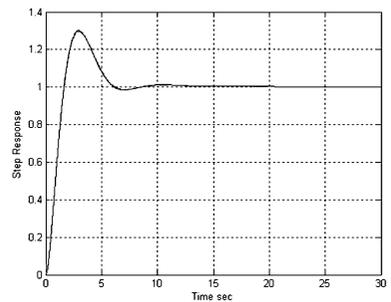


图 7 参数变化时,分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的系统阶跃响应

Fig. 7 System step response of fractional $PI^\lambda D^\mu$ controller with the change of parameters

由图 6 可以看出,采用常规 PID 进行控制时,转向系统的参数变化使得系统阶跃响应的性能指标都在发生较大的变化.由图 7 可以看出,采用分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 进行控制时,系统的响应时间以及超调量都几乎保持不变.可见,采用分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制系统可以比较精确地跟踪信号,效果更理想.

5 结论

分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器突破了传统 PID 控制器的概念,使得微分器和积分器的阶次可以不是整数,进一步拓宽了 PID 控制器参数的选择范围.本文提出的分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的数字实现方法为工程实际应用提供了可能性.仿真结果表明,采用分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的控制系统能获得更好的稳定性.

参 考 文 献

- 1 Richard C, Dorf, Robert H Bishop 著. 现代控制系统(第八版). 北京:高等教育出版社,2001:587~588(Richard C, Dorf, Robert H Bishop. Modern control system (Eighth Edition). Beijing: Higher Education Press, 2001: 587~588 (in Chinese))
- 2 Podlubny I. Fractional order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1999, 44(1): 208~214
- 3 Monje C A, Vinagre B M, Chen Y Q, Feliu V, Lanusse P and Sabatier J. Proposals for fractional PID tuning. In *Fractional Differentiation and its Applications*, 2004
- 4 Alain Oustaloup, Francois Levron, Benoit Mathieu, Florence M Nanot. Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. *IEEE Transactions on circuits and systems 1: Fundamental theory and applications*, 2000, 47(1): 25~39
- 5 Vinagre B M, Podlubny I, Hernandez A and Feliu V. Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications. *Fractional calculus & applied analysis*, 2000, 2(3): 231~248
- 6 Duarte Valério, José Sá da Costa. Ziegler-nichols type tuning rules for fractional pid controllers. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Long Beach, California, 2005
- 7 Yung-Hsiang Judy Hsu J, Christian Gerdes. Stabilization of a steer-by-wire vehicle at the limits of handling using feedback linearization. *Proceedings of IMECE2005 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2005, (11): 5~11
- 8 王洪礼, 乔宇, 张锋等. 汽车四轮转向动力系统的 Hybrid 控制研究. *动力学与控制学报*, 2003, 1(1): 53~58 (Wang Hongli, Qiao Yu, Zhang Feng, etc. Research of Hybrid control for vehicle 4WS dynamic system. *Journal of Dynamics and Control*, 2003, 1(1): 53~58 (in Chinese))

THE CONTROL RESEARCH OF FRACTIONAL ORDER $PI^{\lambda}D^{\mu}$ AND ITS APPLICATION TO VEHICLE STEERING-BY-WIRE SYSTEM*

Tian Jie¹ Chen Ning² Gao Xiang³

(1. The School of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(2. The College of Electro-Mechanical Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(3. The School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract The steering-by-wire system is different from the traditional steering system. It is a complicated system composed of steering motor, steering mechanism, steering angle sensor, steering torque sensor and ECU. System performance was influenced by parameter uncertainties, un-modeled dynamics and the front tire self-aligning moment. According to the design demand of the steering-by-wire system robust, a new $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control strategy based on fractional calculus was proposed, which can ensure the robust of the steering-by-wire system during the special range of frequency. The five design parameters of controller were achieved by the method of optimum. Oustaloup method was used to simulate the fractional controller, and the simulation results showed the effectiveness of the control method to improve the robust of the steering-by-wire system.

Key words fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller, steering-by-wire system, oustaloup method, robust control