

紧急避让路径跟踪自抗扰控制

赵又群¹, 王 健¹, 季学武², 李 波¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 自动紧急避让作为一种辅助驾驶系统, 能够提高汽车行驶的安全性. 为了提高不同质量参数、不同轴距车辆路径跟踪性能, 以二自由度车辆模型为基础, 设计二阶自抗扰控制器. 车辆模型参数变化可以通过三阶扩张状态观测器进行观测和补偿. 针对避让过程存在侧向加速度过大或产生阶跃、曲率不连续问题, 引入三次 B 样条曲线对避让路径进行再规划. 采用软件 Carsim 与 Simulink 联合仿真方法进行控制器性能验证. 仿真结果表明, 基于自抗扰方法设计的紧急避让路径跟踪控制器能够保证不同车型车辆很好地跟踪规划的轨迹, 保证车辆稳定性.

关键词: 路径跟踪; 自抗扰控制; 紧急避让; 联合仿真

中图分类号: U461.6

文献标志码: A

Path Tracking for Evasive Collision Avoidance Based on Active Disturbance Rejection Control

ZHAO Youqun¹, WANG Jian¹, JI Xuewu², LI Bo¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The automatic evasive collision avoidance system can promote the vehicle driving safety. A robust path tracking controller based on the active disturbance rejection control algorithm was proposed to improve the path tracking performance of vehicles with different mass parameters and different wheelbase parameters. The change of vehicle model parameters can be observed and compensated by the third order extended state observer. The cubic B spline was used to solve the curvature discontinuity and high lateral acceleration problems in path planning. Carsim and Simulink were used to verify the effectiveness of the proposed path tracking controller. The simulation results show that the proposed controller can control different vehicles to follow the

predesigned evasive path very well, which can guarantee the stability of vehicles.

Key words: path tracking; active disturbance rejection control; evasive collision avoidance; cosimulation

随着世界汽车技术和车辆控制技术的发展, 车辆向着自动化、智能化方向发展. 自动紧急避让系统能够利用毫米波雷达、激光雷达监测自车与前车以及障碍物之间的相对距离、速度和加速度, 自动规划出避让路径, 通过控制车辆前轮转角完成转向避让动作. 自动紧急避让系统是一个集环境感知、规划决策、自动控制多等级和多功能于一体的综合系统^[1-2]. 车辆在紧急避让过程中, 车速较高, 存在较强的非线性和不确定性, 高速车辆路径跟踪是车辆智能化发展进程中亟待解决的关键技术问题.

自动紧急避让通过自动控制前轮转向完成避让过程. 国内外学者采用 PID (proportion integration differentiation) 控制、最优控制、鲁棒控制等方法控制车辆前轮完成自动转向过程^[3-4]. 虽然 PID 控制简单, 但是对车辆特性变化鲁棒性不强; 最优控制和鲁棒控制算法复杂, 不利于工程应用, 且算法的控制效果很大程度上依赖于被控对象模型的精度.

本文独创性地采用自抗扰方法进行车辆紧急避让路径跟踪控制研究, 自抗扰控制在传统 PID 控制基础上进行二次开发, 将现代控制理论与经典控制理论相结合, 能够观测和补偿外界干扰和模型不确定性, 满足鲁棒性要求^[5-8]. 自抗扰控制能够保证不同车型车辆很好地跟踪规划的避让路径, 自抗扰控制现在已经成功应用于飞行器控制、风力发电机控制和导弹控制领域^[9-12].

收稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(11072106)

第一作者: 赵又群(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为底盘控制及主动安全. E-mail: yqzhao@nuaa.edu.cn

通讯作者: 王 健(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为智能驾驶及主动安全. E-mail: wangjian1987228@163.com

1 车辆动力学模型及路径规划

1.1 车辆动力学模型

车辆二自由度动力学方程能够较为准确地反映车辆的横向动力学特性^[13]. 为了使设计的控制器便于工程应用,本文以二自由度车辆模型为基础,设计路径跟踪控制器. 忽略转向系统的影响,直接以前轮转角作为输入;忽略悬架的作用,忽略路面不平和空气阻力影响. 其中,二自由度车辆模型如图 1 所示. 图中: l_f, l_r 分别为车辆质心到前、后轴之间的距离; F_{Y1}, F_{Y2} 分别为前、后轮所受到的侧向力; α_1, α_2 分别为前、后轮侧偏角; u_1, u_2 分别为车辆前、后车轮行驶速度大小; δ_f 为前轮转角; β 为车辆质心侧偏角; u 为车辆质心处纵向速度; v 为车辆质心处侧向速度; V 为车辆质心速度.

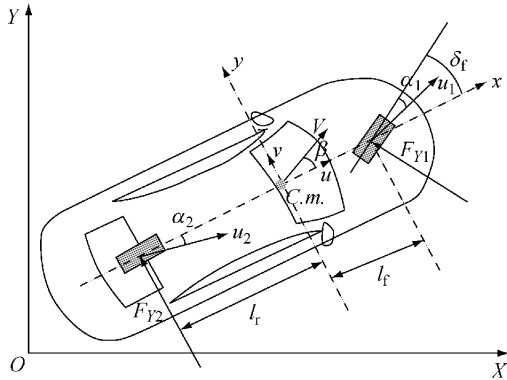


图 1 车辆二自由度模型

Fig.1 Vehicle model of 2-degree-freedom

车辆二自由度动力学状态方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \mathbf{B} \delta_f \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_f + c_r}{mu} & -1 - \frac{l_f c_f - l_r c_r}{mu^2} \\ -\frac{l_f c_f - l_r c_r}{I_z} & -\frac{l_f^2 c_f + l_r^2 c_r}{I_z u} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{c_f}{mu} \\ \frac{l_f c_f}{I_z} \end{bmatrix}$$

其中: m 为车辆质量; I_z 为车辆横摆转动惯量; c_f, c_r 分别为前、后轮侧偏刚度; γ 为车辆质心横摆角速度.

对车辆二自由度车辆模型状态方程进行拉普拉斯变化,得到横摆角速度与前轮转角之间的传递函数公式为

$$\frac{\gamma(s)}{\delta_f(s)} = \frac{ds + e}{as^2 + bs + c} \quad (2)$$

其中: $a = muI_z, b = m(l_f^2 c_f + l_r^2 c_r) + I_z(c_f + c_r), c = c_f c_r(l_f + l_r)^2 / u - mu(l_f c_f - l_r c_r), d = muc_f l_f, e = c_f c_r(l_f + l_r).$

1.2 路径规划

紧急避让过程车速较高($>80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),规划的避让路径要求被执行机构能够执行,并且保证车辆转向过程车辆的稳定性. 避让路径需要满足避障约束、侧向加速度约束、转向速度约束、曲率连续约束^[14]. 考虑避让路径最短,设计两段相切圆弧避让路径,并且采用三次 B 样条进行曲线拟合,同时保证规划的路径满足上述约束条件. 以汽车质心为参考点,避让过程如图 2 所示. 图中: R_1 为车辆质心转弯半径; R_2 为车辆右前方转弯半径; dy 为质心侧向位移; dx 为车辆纵向位移; S_{steer} 为最小避让距离; θ 为车辆质心转过的角度; H_y 为障碍物左侧宽度.

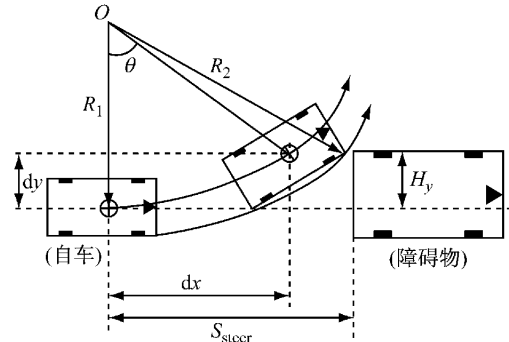


图 2 避让过程图

Fig.2 Collision avoidance

由图 2 可以得到如下关系式:

$$R_1 = \frac{V^2}{0.67 \mu_m g} \quad (3)$$

$$dx = V \sqrt{\frac{2dy}{0.67 \mu_m g}} \quad (4)$$

式中: V 为车辆质心处纵向速度; μ_m 为路面附着系数; g 为重力加速度. 此处限制极限工况下,仅有 67%侧向加速度被利用.

当车速 $V = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \mu_m = 0.8, H_y = 1.5 \text{ m}$ 工况下,路径规划结果如图 3 所示. 其中,图 3a 为规划的避让路径,图 3b 为路径曲率变化.

2 自抗扰控制器设计

对式(2)进行拉普拉斯反变换得

$$\ddot{\gamma} = -\frac{b}{a} \dot{\gamma} - \frac{c}{a} \gamma + \frac{d}{a} \dot{\delta}_f + \frac{e}{a} \delta_f \quad (5)$$

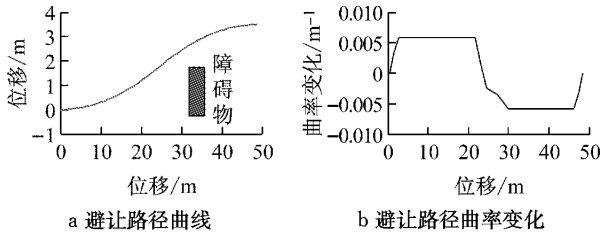


图 3 路径规划图

Fig. 3 Path planning

令

$$\gamma = x_1, \dot{\gamma} = x_2, \ddot{\gamma} = \dot{x}_2, b_0 = \frac{e}{a}$$

$$f[x_1, x_2, \delta_f] = -\frac{b}{a} \dot{\gamma} - \frac{c}{a} \gamma + \frac{d}{a} \delta_f$$

方程(5)可以化成积分器串联型系统,即如下标准形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, \delta_f) + b_0 \delta_f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

设计二阶自抗扰路径跟踪控制器如图 4 所示。图中: γ_d 为理想横摆角速度; γ 为实际横摆角速度; v_1, v_2 为跟踪微分器输出; z_1, z_2 和 z_3 均为扩张状态观测器输出; e_1, e_2 为非线性组合的输入误差; u_0 为非线性组合输出; u 为被控对象实际输入; w 为外界干扰; b_0 为设计参数。

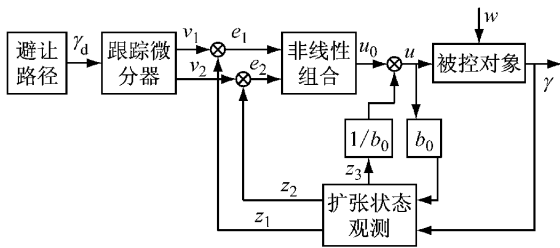


图 4 二阶自抗扰控制器

Fig. 4 Second order active disturbance rejection controller

由图 4 可以看出自抗扰控制器由 3 部分组成: 跟踪微分器、非线性组合、扩张状态观测器。其中跟踪微分器能够提取理想输入的一阶导数,并对输入信号进行滤波处理;扩张状态观测器能够将外界干扰和模型不确定性部分观测出来补偿掉。每一部分离散化表达形式如下。

(1)跟踪微分器

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf_{han} \end{cases} \quad (7)$$

f_{han} 可以表示为

$$\begin{cases} d_0 = rh \\ d_1 = d_0 h \\ \gamma(k) = v_1(k) - \gamma_d(k) + hv_2(k) \\ a_0 = \sqrt{d_0^2 + 8r|\gamma(k)|} \\ a = \begin{cases} v_2(k) + \frac{a_0 - d_0}{2} \text{sgn} \gamma(k), & |\gamma(k)| > d_1 \\ v_2(k) + \frac{\gamma(k)}{h}, & |\gamma(k)| \leq d_1 \end{cases} \\ f_{han} = - \begin{cases} r_{\text{sign}}(a), & |a| > d_0 \\ ra/d_0, & |a| \leq d_0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\gamma_d(k)$ 为理想横摆角速度; r 和 h 分别为速度因子和仿真步长; $v_1(k)$ 和 $v_2(k)$ 分别为跟踪微分器输出。

(2)扩张状态观测器

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - \gamma(k) \\ f_e = f_{al}(e(k), a_1, \delta) \\ f_{e1} = f_{al}(e(k), a_2, \delta) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h[z_3(k) - \beta_{02}f_e + b_0u(k)] \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h[-\beta_{03}f_{e1}] \end{cases} \quad (9)$$

其中: $z_1(k), z_2(k)$ 和 $z_3(k)$ 均为扩张状态观测器输出。

非线性函数 $f_{al}(e(k), a, \delta)$ 可以描述为

$$f_{al}(e(k), a, \delta) = \begin{cases} |e(k)|^a \text{sgn}[e(k)], & |e(k)| > \delta \\ e(k)/\delta^{1-a}, & |e(k)| \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_1, a_2, δ 和 b_0 均为设计参数; β_{01}, β_{02} 和 β_{03} 为扩张状态观测器增益,可以表示为^[15]

$$\beta_{01} = 1, \beta_{02} = \frac{1}{2\sqrt{h}}, \beta_{03} = \frac{2}{5^2 h^{1.2}} \quad (11)$$

(3)非线性组合

$$\begin{cases} e_1(k+1) = v_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = v_2(k+1) - z_2(k+1) \\ f_{e2} = f_{al}(e_1(k+1), \alpha_{01}, \delta_0) \\ f_{e3} = f_{al}(e_2(k+1), \alpha_{02}, \delta_0) \\ u_0(k+1) = \beta_1 f_{e2} + \beta_2 f_{e3} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\beta_1, \beta_2, \alpha_{01}, \alpha_{02}$ 和 δ_0 均为设计参数。

3 联合仿真试验

为了验证自抗扰路径跟踪控制器的控制效果,进行软件 Carsim 和 Simulink 联合仿真验证。车辆动

力学仿真软件 Carsim 提供了 3 种不同质量参数、不同轴距的车辆模型: C-Class, Hatchback; E-Class, Sedan; D-Class, Minivan. 设定仿真环境: 车辆纵向速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 路面附着系数为 0.8, Carsim 输入为左右前轮转角, 输出为车辆当前时刻位姿信息, 路径输入为第一部分规划的理想避让路径曲线. 自抗扰控制器参数经过不断调整试验得到: $r=120$, $h=0.001$, $\beta_{01}=600$, $\beta_{02}=120\ 000$, $\beta_{03}=8\ 000\ 000$, $a_1=0.5$, $a_2=0.5$, $\delta=0.5$, $b_0=464$, $\beta_1=1.5$, $\beta_2=2$, $\alpha_{01}=0.25$, $\alpha_{02}=1$, $\delta_0=0.01$. 不同车型跟踪理想规划路径结果如图 5 所示.

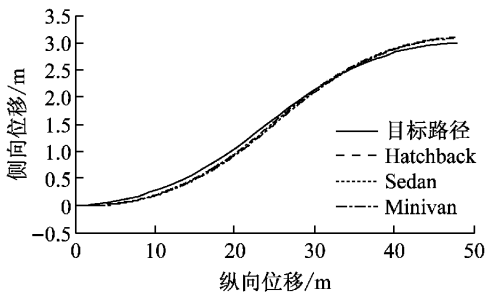


图 5 路径跟踪曲线
Fig.5 Path tracking

从图 5 可以看出, 自抗扰路径跟踪控制器能够控制不同轴距、不同质量参数车辆很好地跟踪目标规划轨迹.

侧向位移误差变化曲线如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 路径跟踪控制器能够控制不同车型车辆跟踪理想目标路径, 且最大侧向位移偏差最大值仅为 0.12 m.

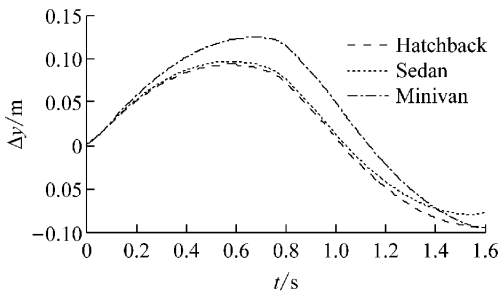


图 6 路径跟踪侧向位移误差
Fig.6 Lateral displacement error of path tracking

避让过程不同车型车辆前轮转角变化如图 7 所示. 图 8 为不同车辆实际横摆角速度与理想横摆角速度变化曲线图. 从图中可以看出实际路径跟踪控制器能够控制不同车型车辆快速无超调地跟踪理想横摆角速度.

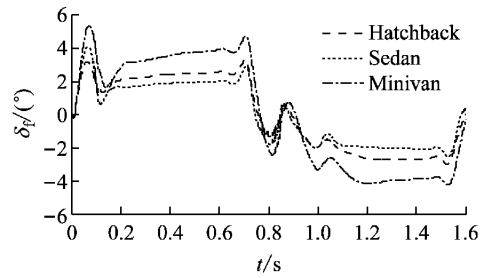


图 7 不同车辆前轮转角输入
Fig.7 Front wheel angle input of different vehicles

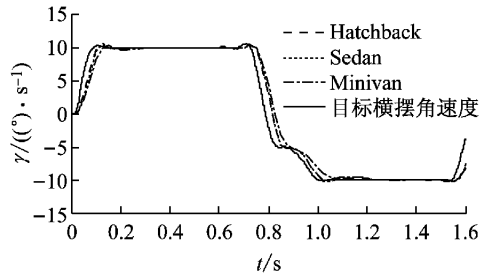


图 8 横摆角速度变化
Fig.8 Variation in yaw velocity

自抗扰控制器能够将外界干扰和模型不确定性观测出来, 观测器观测出的干扰量变化情况如图 9 所示.

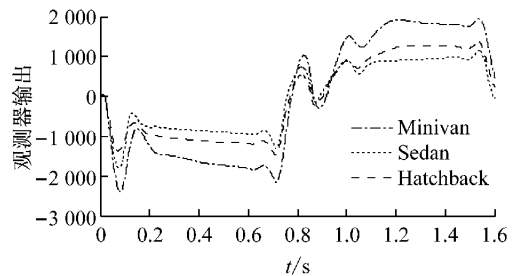


图 9 扩张状态观测器输出
Fig.9 Output of extended state observer

为了更加真实地显示整个避让过程, 可以通过软件 Carsim 进行实时仿真演示, 如图 10 所示. 汽车能够安全无碰撞地避让前方车辆及其障碍物.

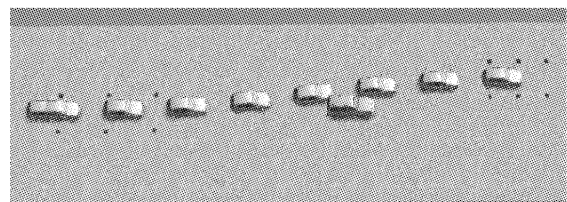


图 10 车辆紧急避让过程演示
Fig.10 Demonstration of vehicle emergency collision avoidance

4 结论

(1) 联合仿真表明二阶自抗扰控制器能够保证不同轴距、不同质量参数的车辆跟踪目标路径,自抗扰控制器算法简单,便于工程应用。

(2) 基于二自由度车辆模型,通过控制车辆横摆角度,设计二阶自抗扰控制器,方法简单可行。

(3) 外界干扰和模型不确定性(总扰动量)可以通过扩张状态观测器观测出来加以补偿,以保证系统鲁棒性。

参考文献:

- [1] 徐友春,王荣本,李兵,等. 世界智能车辆近况综述[J]. 汽车工程,2011,23(5):289.
XU Youchun, WANG Rongben, LI Bing, *et al.* A summary of worldwide intelligent vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 23(5): 289.
- [2] 李玮,高德芝,段建民. 智能车辆自由换道模型研究[J]. 公路交通科技,2010,27(2):119.
LI Wei, GAO Dezhi, DUAN Jianmin. Research on lane change model for intelligent vehicles [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(2): 119.
- [3] ZHENG Bing, Pahnrog O, Bany L. Active steering control with front wheel steering [C] // *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. Boston: IEEE, 2004: 1475-1480.
- [4] Tilman B, Dirk O, Bilin A G, *et al.* Robust vehicle steering control design based on the disturbance observer [J]. *Annual Reviews in Control*, 2002, 26: 139.
- [5] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3):13.
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3):13.
- [6] GAO Qiang, SUN Zhan, YANG Guolai, *et al.* A novel active disturbance rejection-based control strategy for a gun control system[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(12): 4141.
- [7] 韩京清. 扩张状态观测器参数与非波纳奇数列[J]. 控制工程,2008, 15(增1): 1.
HAN Jingqing. Parameters of the extended state observer and fibonacci sequence [J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15(Suppl. 1): 1.
- [8] 李一染,陈慧,高博麟. 自抗扰控制在主动转向控制中的应用[J]. 汽车工程,2011, 33(5):388.
LI Yiran, CHEN Hui, GAO Bolin. Application of active disturbance rejection control to active front steering control [J]. *Automotive Engineering*, 2011,33(5):388.
- [9] 陈新龙,杨淼,耿斌斌. 自抗扰控制技术在某型导弹上的应用[J]. 飞行力学,2006, 24(1):81.
CHEN Xinlong, YANG Di, GENG Binbin. Application of auto-disturbance-rejection-controller to a missile [J]. *Flight Dynamics*, 2006, 24(1):81.
- [10] 齐乃明,秦昌茂,宋志国. 高超声速飞行器改进自抗扰串级解耦控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011, 43(11):34.
QI Naiming, QIN Changmao, SONG Zhiguo. Improved ADRC cascade decoupling controller design of hypersonic vehicle [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(11):34.
- [11] 张先勇,吴捷,杨金明. 基于自抗扰解耦的变速恒频风力发电功率控制系统[J]. 电气传动,2007, 37(2): 8.
ZHANG Xianyong, WU Jie, YANG Jinming. Power control strategy based on auto disturbance rejection decoupling for a variable speed constant frequency generation system [J]. *Electric Drive*, 2007, 37(2): 8.
- [12] 杨苹,周少雄,胡斌,等. 双馈风力发电机系统的自抗扰神经网络的励磁控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 251.
YANG Ping, ZHOU Shaoxiong, HU Bin, *et al.* Active disturbance rejection neural networks excitation control of double-fed induction generator [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 251.
- [13] 余志生,赵六奇,夏群生,等. 汽车理论[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2000.
YU Zhisheng, ZHAO Liuqi, XIA Qunsheng, *et al.* *Automobile theory*[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [14] Gómez-Bravo F, Cuesta F, Ollero A, *et al.* Continuous curvature path generation based on β spline curves for parking manoeuvres [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56: 360.
- [15] 陈增强,孙明玮,杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报,2013,39(5):574.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5):574.