

文章编号:1672-3961(2008)04-0005-06

# 高速移动平台横向运动自抗扰控制

阮久宏<sup>1,2</sup>, 李贻斌<sup>2</sup>, 荣学文<sup>2</sup>, 邱绪云<sup>1</sup>

(1. 山东交通学院先进车辆与机器人研究所, 山东 济南 250023;

2. 山东大学机器人研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:**采用自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法,对高速轮式车辆和机器人等移动平台的横向运动控制技术进行了研究.首先给出带约束的平台横向运动数学模型,对ADRC进行简要介绍;然后将模型变换为两个仿射型的子系统模型的串联,并针对高速运行要求分别设计两个子系统的ADRC控制器;最后在平台参数摄动和道路扰动的环境下进行仿真.结果表明,ADRC控制器能够在0~40 m/s速度范围内控制平台完成平稳和高精度的横向运动.

**关键词:**高速移动平台;轮式车辆;轮式机器人;横向运动;自抗扰控制

**中图分类号:**TP242.6; U461.6 **文献标志码:**A

## Study on the lateral locomotion control of an ADRC-based high-speed mobile platform

RUAN Jiu-hong<sup>1,2</sup>, LI Yi-bin<sup>2</sup>, RONG Xue-wen<sup>2</sup>, QIU Xu-yun<sup>1</sup>

(1. Advanced Vehicle and Robot Institute, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China;

2. Center for Robotics, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The active disturbance rejection control (ADRC) method was utilized to study lateral locomotion control, which is a key technology for platform (such as high-speed wheeled vehicle and robot) intelligence and autonomy. First the platform lateral locomotion mathematic model with constraints was given, and the ADRC was briefly introduced. Then the model was transformed to a series format with affined models of two sub-systems, and the two ADRC controllers were designed for the two sub-systems, respectively. Finally, simulations were done under system parameter perturbations and road disturbances conditions. The results show that the ADRC controllers can make the platform accomplish smooth and high precision lateral locomotion within a 0~40 m/s velocity scale.

**Key words:** high-speed mobile platform; wheeled vehicle; wheeled robot; lateral locomotion; active disturbance rejection control

## 0 引言

高速轮式车辆和机器人是两种重要形式的地面移动平台,横向运动控制则是其实现智能化与自主化的关键技术之一.所谓横向运动控制,是指控制平

台自动跟踪规划好的运行轨迹(自主化)或驾驶员指令(智能化).由于平台和道路参数的变化,以及横向运动固有的非线性特性,平台横向控制器的设计往往较为困难.

文献【1】使用线性二次控制,文献【2】使用滑动模态控制,文献【3】使用非线性增益优化控制,

收稿日期:2007-12-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA04Z206);山东省教育厅科技发展计划资助项目(J07WA10);山东交通学院科研基金资助项目(Z200724)

作者简介:阮久宏(1971-),男,山东济宁人,副教授,工学博士,研究方向为移动平台、先进车辆与ITS主动安全、机器人、先进控制.

E-mail: jh\_ruan@bit.edu.cn

文献[4]使用预测控制,文献[5-6]使用  $H_\infty$  控制等分别研究了横向运动控制器的设计问题,上述研究有的需要使用精确的数学模型,有的需要确定的模型界和参数界,工程实用性往往并不理想;文献[7-8]使用模糊逻辑研究了车辆横向运动控制问题,获得了较好的效果,但其模糊规则靠手工确定,如果控制精度要求较高,模糊划分较多,手工就不能胜任,而使用自动设计方法确定模糊规则在目前阶段还未达到工程化水平。

ADRC<sup>[9]</sup>是中国科学院韩京清研究员提出的一种不依赖系统模型的新型控制技术,它能实时估计并补偿系统运行时受到的各种“外扰”和“内扰”的总和作用,并结合特殊的非线性反馈结构实现良好的控制品质,具有超调小、响应快、精度高、抗干扰能力强、算法简单等特点,并且适于数字化实现。

本文使用 ADRC 来探索高速移动平台的横向运动控制问题,为正在研制的一种高速高机动平台的工程化设计提供指导.除此之外,研究对于车辆辅助驾驶和主动安全等技术的研发亦具有重要意义,可为智能交通系统的建设提供技术支撑。

## 1 轮式移动平台横向运动数学模型

轮式移动平台横向运动数学模型如式(1)~(5)所示.其中,式(1)~(2)是横向动力学线性模型<sup>[10]</sup>,描述了平台相对于其本体固联坐标系的横向运动特性,是在车轮转向角  $\delta$  受到约束的条件下得到的,因而附加上方程(3);同时,为了在地球固联坐标系中研究平台的横向运动特性,加上坐标转换方程(4)<sup>[2]</sup>;为了与平台控制的真实情况相符,使用了转向执行器的数学模型(5)<sup>[6]</sup>.这样就得到由5个方程描述的参考坐标系下的轮式移动平台的横向运动数学模型.模型假设平台采用前轮转向,且两个转向轮转角相同。

$$\dot{V}_y = -V_x \dot{\Psi} - 2 \left( C_{sf} \frac{V_y + l_f \dot{\Psi}}{mV_x} + C_{sr} \frac{V_y - l_r \dot{\Psi}}{mV_x} \right) + \frac{2C_{sf}\delta}{m}; \quad (1)$$

$$\dot{\Psi} = 2l_f C_{sf} \frac{V_y + l_f \dot{\Psi}}{I_z V_x} - 2l_r C_{sr} \frac{V_y - l_r \dot{\Psi}}{I_z V_x} + \frac{2l_f C_{sf} \delta}{I_z}; \quad (2)$$

$$|\delta| \leq \delta_{\max}; \quad (3)$$

$$\dot{y} = V_x \sin(\Psi) + V_y \cos(\Psi); \quad (4)$$

$$T_s \dot{\delta} + \delta = \delta_c. \quad (5)$$

式中,  $V_x$ ——平台相对固连坐标系的纵向速度;

$V_y$ ——平台相对固连坐标系的横向速度;

$\dot{y}$ ——平台相对参考坐标系的横向速度;

$\Psi$ ——平台横摆角;

$\delta$ ——前轮转向角;

$\delta_{\max}$ ——最大转向角,这里取为 0.14 rad;

$\delta_c$ ——转向角命令。

其余参数为平台参数<sup>[2,6]</sup>,见表1。

表1 平台参数  
Table 1 Platform parameters

参数	含义	单位	名义值
$M$	本体质量	kg	1 480
$I_z$	绕质心垂轴的转动惯量	kg·m <sup>2</sup>	2 350
$l_f$	前轴到平台质心的距离	m	1.05
$l_r$	后轴到平台质心的距离	m	1.63
$C_{sf}$	前轴轮胎角刚度	N/rad	67 500( $C_{sf\_nom}$ )
$C_{sr}$	后轴轮胎角刚度	N/rad	47 500( $C_{sr\_nom}$ )
$T_s$	转向执行机构时间常数	s	0.2( $T_{s\_nom}$ )

## 2 ADRC 简介

包括车辆运动系统在内的很多被控对象的数学模型都可以简化成如下的仿射型形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \dot{x}, w(t), t) + b(t)u, \\ y = x. \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $w(t)$ 为对象外部扰动,  $u$ 为控制量,  $b(t)$ 为控制放大系数,  $y$ 为输出,  $f(x, \dot{x}, w(t), t)$ 是包括对象“内扰”和“外扰”在内的“总扰动”。

通常情况下,对于模型可转化为上述二阶仿射模型的系统,采用一个二阶 ADRC 控制器均可获得理想的控制性能.二阶 ADRC 控制器的标准结构一般如图1所示<sup>[9,11]</sup>。

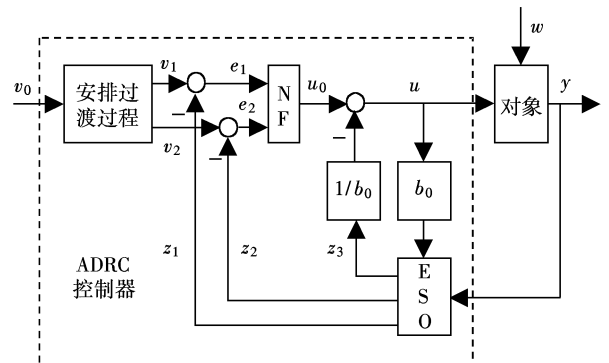


图1 二阶 ADRC 控制器结构

Fig.1 Two-order ADRC controller structure

由图1可见,ADRC由三部分组成:“安排过渡过程”,“非线性反馈(nonlinear feedback, NF)”和“扩张状态观测器(extended state observer, ESO)”.图中,

$v_0$  为控制目标,  $v_1$  是  $v_0$  的跟踪信号,  $v_2$  是  $v_0$  的微分信号;  $z_1, z_2$  是系统输出  $y$  及其微分的估计,  $z_3$  是对象总扰动  $f(x, \dot{x}, w(t), t)$  的估计;  $e_1, e_2$  是误差,  $u_0$  是 NF 的输出,  $b_0$  是  $b(t)$  的估计.

ADRC 的离散算法如下:

(1) 安排过渡过程

“安排过渡过程”可以使用如式(7)所示的“跟踪微分器 (track differentiator, TD)”或其他合适方法生成.

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h \cdot v_2(k), \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h \cdot fst(v_1(k) - v_0, v_2(k), r, h_0). \end{cases} \quad (7)$$

(2) 估计状态和总扰动(ESO 方程)

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y(k); \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e); \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02} \cdot fal(e, \alpha_1, \delta) + b_0u(k)); \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_{03} \cdot fal(e, \alpha_2, \delta). \end{cases} \quad (8)$$

(3) 控制量的形成:

① NF 输出:

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k); \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k); \\ u_0 = K_P \cdot fal(e_1, \alpha_P, \delta_P) + K_D \cdot fal(e_2, \alpha_D, \delta_D). \end{cases} \quad (9)$$

② 控制量合成:

$$u(k) = u_0 - z_3(k)/b_0. \quad (10)$$

式(7) ~ (10)中,  $h$  为控制周期,

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \cdot \text{sgn}(e), & |e| > \delta, \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (11)$$

$$fst(\cdot) = \begin{cases} -ra, & |a| \leq d, \\ -r \cdot \text{sgn}(a), & |a| > d. \end{cases} \quad (12)$$

而  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数,

$$a = \begin{cases} v_2 + \frac{v_0}{h}, & |y_0| > d_0, \\ v_2 + \frac{\text{sgn}(y_0) \cdot (a_0 - d)}{2}, & |y_0| \leq d_0. \end{cases}$$

$a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y_0|}$ ,  $d = rh$ ,  $d_0 = dh$ ,  $y_0 = v_1 - v_0 + hw_2$ , 其他参数的含义请参见文献[9,11].

### 3 ADRC 控制器设计

#### 3.1 平台横向运动数学模型变换

为设计平台横向运动 ADRC 控制器,需将系统

模型(1) ~ (5)转换成如式(6)所示的仿射型.为此,令  $x_1 = y, x_2 = \Psi, x_3 = \dot{\Psi}, x_4 = V_y, x_5 = \delta, u = \delta_c$ , 将式(1) ~ (5)重写为式(13)、(14),并记式(13)对应的子系统为  $\Sigma_{y\Psi}$ ,式(14)对应的子系统为  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$ .

$$\Sigma_{y\Psi} : \begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(t) + b_{y\Psi}(t)u_{y\Psi} \Big|_{b_{y\Psi} = V_x, u_{y\Psi} = \sin(x_2)}; \\ f_1(t) = x_4 \cos(x_2); \\ y = x_1. \end{cases} \quad (13)$$

$$\Sigma_{\Psi\delta_c} : \begin{cases} \dot{x}_2 = x_3; \\ \dot{x}_3 = f_2(t) + b_{\Psi\delta_c}(t)u_{\Psi\delta_c} \Big|_{b_{\Psi\delta_c}(t) = \frac{2l_f C_{sf}}{I_z}, u_{\Psi\delta_c} = x_5}; \\ T\dot{x}_5 + x_5 = u \Big|_{|u| \leq \delta_{\max}}; \\ f_2(t) = 2l_f C_{sf} \frac{x_4 + l_f x_3}{I_z V_x} - 2l_r C_{sr} \frac{x_4 - l_r x_3}{I_z V_x}; \\ \dot{x}_4 = -V_x x_3 - 2\left(C_{sf} \frac{x_4 + l_f x_3}{mV_x} + C_{sr} \frac{x_4 - l_r x_3}{mV_x}\right) + \frac{2C_{sf}}{m} x_5; \\ y_1 = x_2 \Big|_{x_2 = \arcsin(u_{y\Psi})}. \end{cases} \quad (14)$$

据式(13)、(14),可进一步将平台横向运动表述为一个由两个子系统  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$ 、 $\Sigma_{y\Psi}$  串联成的非线性对象,如图 2 所示.其中,  $u$  (即  $\delta_c$ ) 为子系统  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$  的控制量,也是平台横向运动的控制量;  $u_{y\Psi}$  是子系统  $\Sigma_{y\Psi}$  的控制量(中间控制量);子系统  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$  的控制目标通过求解  $\arcsin(u_{y\Psi})$  提供.为保证由  $u_{y\Psi}$  即  $\sin(\Psi)$  求  $\Psi$  的唯一性,设  $|\Psi| \leq 90^\circ$  (工程实现时,可通过坐标系的重建保证该条件始终成立).

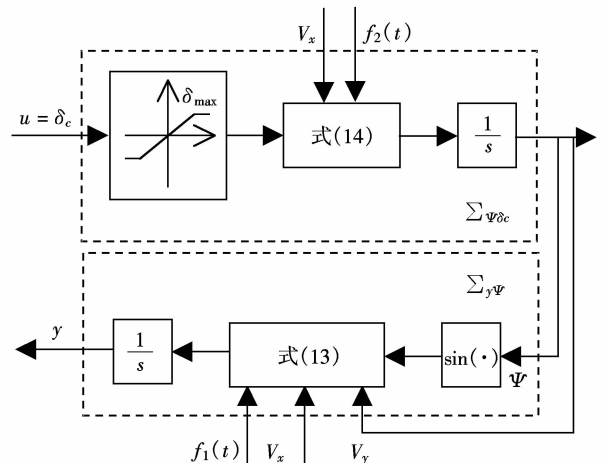


图 2 平台横向运动串联式数学模型框图  
Fig.2 Series model for platform lateral locomotion

### 3.2 平台横向运动控制系统结构

将上述串联系统接入两个 ADRC 控制器构成双闭环控制,如图 3 所示.图中,ADRC <sub>$\Psi$</sub> 、ADRC <sub>$\Psi\delta_c$</sub>  分别是  $\Sigma_{\Psi}$  和  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$  的控制器,ADRC <sub>$\Psi$</sub>  为一阶 ADRC 控制器<sup>[11]</sup>,ADRC <sub>$\Psi\delta_c$</sub>  为二阶 ADRC 控制器,其结构与图 1 所示的控制器结构相同.

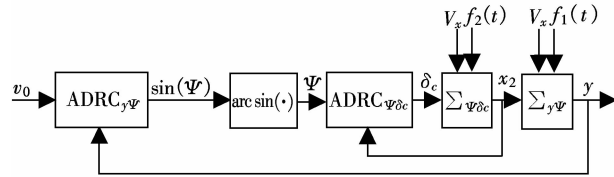


图 3 接入两个 ADRC 后的平台横向运动控制系统结构  
 $v_0$ : 期望横向位移;  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$  分别见式(13)、(14)

Fig.3 The platform lateral locomotion control system structure with two ADRC controllers connected

$v_0$ : lateral displacement expected;  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ : illustrated as formula (13) ~ (14)

### 3.3 控制器参数设计

文献[9]给出了 ADRC 控制器参数设计的指导性建议.本文依据这些建议以及平台横向运动系统的特点确定了所设计控制器的参数,下面给出其设计过程.

**Step 1** 设计“安排过渡过程”参数.“安排过渡过程”参数一般结合对象的实际执行能力和控制目标确定,与 NF 和 ESO 参数的设计过程相对独立.系统  $\Sigma_{\Psi}$  位移  $v_0$  使用正弦函数法<sup>[9]</sup>安排过渡过程,系统  $\Sigma_{\Psi\delta_c}$  横摆角  $\Psi$  使用 TD 法安排过渡过程.

**Step 2** (以二阶 ADRC <sub>$\Psi\delta_c$</sub>  为例)估计  $b_{\Psi\delta_c}$ ,将 NF 的参数  $K_p$  和  $K_D$  取为较小的数,粗调 ESO 参数  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\delta$ .

**Step 3** 交叉调整 ESO 参数和 NF 参数  $K_p$ 、 $\alpha_p$ 、 $\delta_p$ ( $K_D$ 、 $\alpha_D$ 、 $\delta_D$ ).

根据上述步骤,考虑到平台高速运行的要求,选定控制周期  $h = 0.005$  s,在车速  $V_x = 40$  m/s 和平台标称参数下设计了横向运动控制器的一组参数.下文仿真研究表明,这组控制器参数能够在 0~40 m/s 车速范围内对平台参数摄动和道路扰动实现鲁棒控制.

## 4 仿真研究

### 4.1 仿真环境

假设平台以某一固定纵向速度作双移线运动,换道轨迹(安排的过渡过程)如图 4 所示.

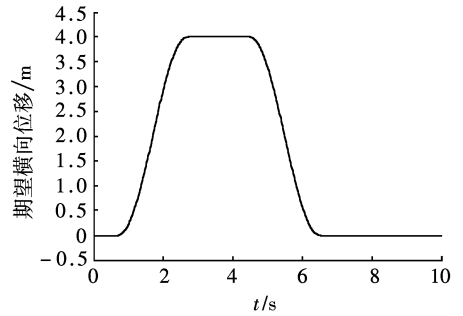


图 4 换道期望横向位移  $T = 4$  s,  $V_x = 15$  m/s  
Fig.4 Expected lateral displacement for lane change

该轨迹使用正弦函数规划算法产生,规划公式如式(15)所示.式中, $v_0(t)$ :期望横向位移;  $W$ :车道宽度;  $T$ :余弦函数周期,是车道切换时间的 2 倍;  $t_1$ :从右车道转向左车道的时刻;  $t_2$ :在左车道上开始行驶的时刻;  $t_3$ :从左车道转向右车道的时刻;  $t_4$ :重新回到右车道的时刻.

$$v_0(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1; \\ \frac{W}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - t_1)\right) \right], & t_1 \leq t \leq t_2; \\ W, & t_2 < t \leq t_3; \\ \frac{W}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - t_3)\right) \right], & t_3 < t \leq t_4; \\ 0, & t_4 < t. \end{cases} \quad (15)$$

### 4.2 仿真参数

由于所规划的轨迹必须经过当前位置,而且其切线方向在当前位置处也应与平台运动方向一致,因此可设初始条件  $y_0 = 0$ ,  $\dot{y}_0 = 0$ ,  $\Psi_0 = 0$ ,  $\dot{\Psi}_0 = 0$ ,  $\delta_0 = 0$ .

仿真时,改变平台和转向机构的参数及纵向速度  $V_x$  和换道时间  $T$ ,以考查 ADRC 控制器的鲁棒性.其中,轮胎角刚度  $C_{s_f}$ 、 $C_{s_r}$  的改变既可表示轮胎本身参数的摄动,也可表示道路地面条件的变化(扰动);平台质心到前、后轴距离的改变则可同时表示质量分布和道路纵向不平度的变化(扰动).因此,上述仿真参数的设置可以考查所设计的 ADRC 控制器对“内部”和“外部”不确定性的适应能力.

### 4.3 仿真结果

图 5~7 分别是  $V_x = 1$  m/s、20 m/s、40 m/s 和平台参数均为标称值下的仿真结果;图 8 示出的是如下参数的仿真结果:  $T = 3$  s,  $V_x = 35$  m/s,  $m = 2220$  kg(标称值的 1.5 倍),  $I_z = 3290$  kg·m<sup>2</sup>(标称值的 1.4 倍),  $l_f = 1.2$  m(质心后移 0.15 m),  $l_r = 1.48$  m,  $C_{s_f} = 40500$  N/rad(标称值的 60%),  $C_{s_r} =$

28 500 N/rad(标称值的 60%),  $T_s = 0.3$  s(标称值的 1.5 倍);图 9 是在  $C_{sf} = [0.85 + 0.15(2U(0,1) - 1)] C_{sf\_nom}$ ,  $C_{sr} = [0.85 + 0.15(2U(0,1) - 1)] C_{sr\_nom}$ , 其他参数同图 8 仿真条件相同的结果,其中  $U(0,1)$  是单位均匀分布函数.图 8、图 9 对应的条件对于平台横向运动自动控制已非常苛刻.

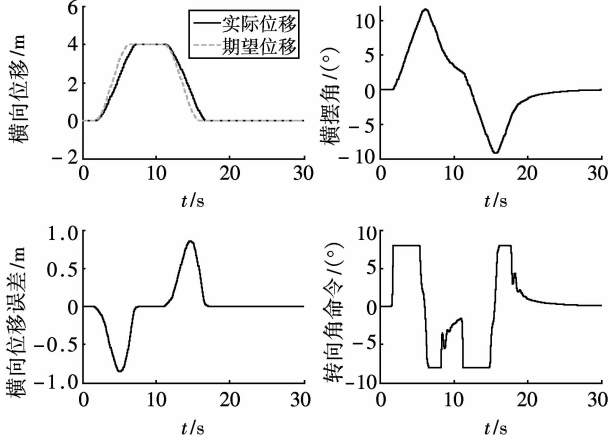


图 5 平台标称参数下的仿真结果  $V_x = 1$  m/s,  $T = 10$  s  
Fig. 5 The simulation result under platform normal parameters

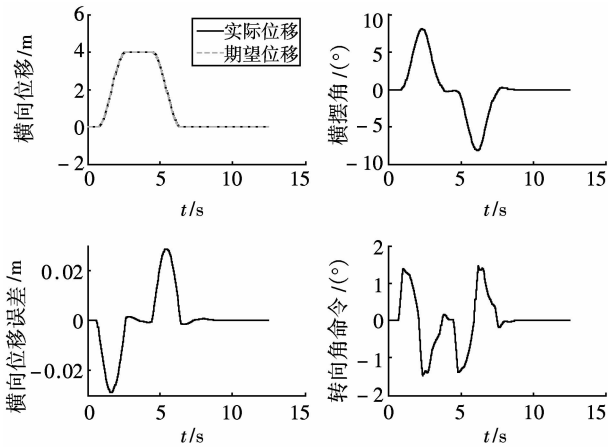


图 6 平台标称参数下的仿真结果  $V_x = 20$  m/s,  $T = 4$  s  
Fig. 6 The simulation result under platform normal parameters

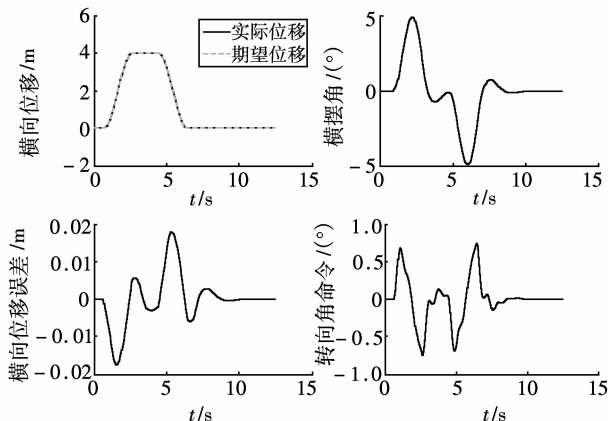


图 7 平台标称参数下的仿真结果:  $V_x = 40$  m/s,  $T = 4$  s  
Fig. 7 The simulation result under platform normal parameters

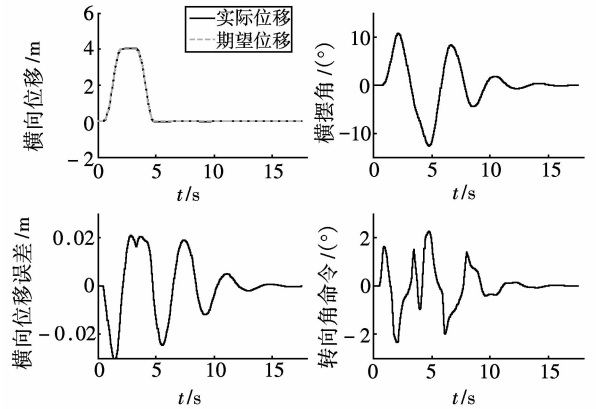


图 8 有摄动和扰动时的仿真结果:  $T = 3$  s,  $V_x = 13$  m/s,  $m = 2\ 220$  kg,  $I_z = 3\ 290$  kg·m<sup>2</sup>,  $l_f = 1.2$  m,  $l_r = 1.48$  m,  $C_{sf} = 40\ 500$  N/rad,  $C_{sr} = 28\ 500$  N/rad,  $T_s = 0.3$  s  
Fig. 8 The simulation result under the disturbances and perturbations

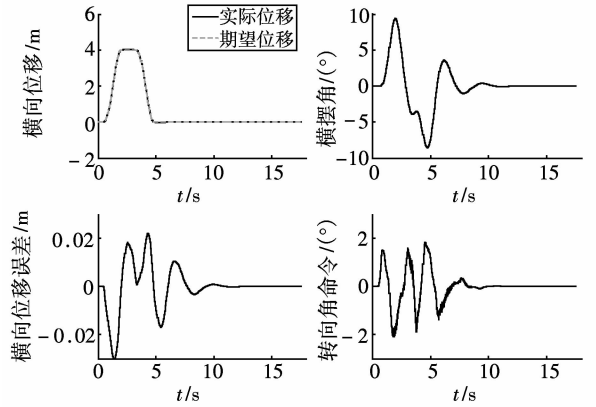


图 9 有摄动和扰动时的仿真结果:  $C_{sf} = 67\ 500 [0.85 + 0.15(2U(0,1) - 1)] C_{sf\_nom}$ ,  $C_{sr} = 47\ 500 [0.85 + 0.15(2U(0,1) - 1)] C_{sr\_nom}$ , 其他参数同图 8 仿真条件  
Fig. 9 The simulation result under the disturbances and perturbations, and other conditions in Figure 8

图 5 换道过程中出现的较大的横向位移误差及车轮转向角饱和现象是由于平台自身横向动力学线性数学模型对车轮转向角的限制造成的,与 ADRC 控制器无关.

图 5~7 结果表明,ADRC 控制器对平台速度的变化具有良好的适应能力,成功实现了对系统横向运动的平稳、高精度控制.

图 8、图 9 结果表明,即使道路切换时间缩短,平台参数和道路条件发生较大改变,平台在 ADRC 控制器的控制下仍具有理想的横向运动性能.

## 5 结论与进一步工作

(1) 当车速较高时,移动平台横向动力学线性

模型可以满足其横向运动控制的要求;

(2) 在自抗扰控制器的控制下,移动平台在 0~40 m/s 速度范围内实现了平稳和高精度的横向运动,对自身参数、道路条件和换道时间等的变化亦具有很强的鲁棒性,可以满足高性能控制的要求,从而表明 ADRC 用于高速移动平台横向运动控制是可行的;

(3) 本文工作可为在研的高速高机动平台的工程化设计提供指导.

进一步工作:

(1) 建立平台自身横向动力学非线性数学模型,研究非线性模型下的 ADRC 控制问题;

(2) 使用真实道路谱研究高速平台横向运动的控制问题,考查 ADRC 对道路附着系数突变时的适应能力;

(3) 本文研究使用的控制周期为 5 ms,一般传感器无法提供这么高的数据更新率,需对长控制周期下的高速移动平台自抗扰控制问题进行更深入的研究,以满足切实可行的工程应用要求.

#### 参考文献:

- [1] SHLADOVER S E. Automatic vehicle control developments in the PARTH program[J]. Vehicular Technology, 1991, 40(1):114-130.
- [2] ZHANG J R. Sliding mode controller for automatic steering of vehicle[C]// The 27<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE Service Center, 2001: 2149-2153.
- [3] SMITH D E, STARKEY J M, BENTON R E. Nonlinear-gain-optimized controller development and evaluation for automated emergency vehicle steering[C]// Proceedings of the American Control Conference. Seattle, WA: the ACC Press, 1995: 3586-3591.
- [4] CHAN Ching-yao, TAN Han-shue. Lane tracking in vehicle-following collision situation[C]// Proceedings of the American Control Conference. San Diego: the ACC Press, 1999: 3697-3701.
- [5] O'BRIEN R T, IGLESIAS P A, URBAN T J. Vehicle lateral control for automated highway systems[J]. Control Systems Technology, 1996, 4(3):266-273.
- [6] WANG Jing-yu, TOMIZUKA M. Robust  $H_{\infty}$  lateral control of heavy-duty vehicles in automated highway system[C]// Proceedings of the American Conference. San Diego: the ACC Press, 1999: 3671-3675.
- [7] HESSBURG T, TOMIZUKA M. Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance [J]. IEEE Control Systems, 1994(2): 55-63.
- [8] ECOLE CENTRALE DE LILLE, LAIL. Fuzzy controller for lateral guidance of busses[C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Vancouver, British Columbia: the IEEE Control Systems Society, 2002: 110-115.
- [9] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3):13-18.  
HAN Jing-qing. From PID technique to active disturbance rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3):13-18.
- [10] PHAM H A, Hedrick J K. A robust optimal lateral vehicle control strategy[C]// Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications. Dearborn, MI: IEEE Service Center, 1996: 361-366.
- [11] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制率——NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 10(3):221-225.  
HAN Jing-qing. Nonlinear state error feedback theory [J]. Control and Decision, 1995, 10(3):221-225.

(编辑:许力琴)