

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210897

# 基于快速非奇异终端滑模的隧道工程 车辆轨迹跟踪研究

黄陶陶<sup>1</sup> 刘放<sup>2</sup> 宋泽鹏<sup>1</sup>

(1.西南交通大学唐山研究院 唐山 063000; 2.西南交通大学机械工程学院 成都 610036)

**摘要:** 针对工程车辆轨迹跟踪控制方法中存在的跟踪精度低、响应速度慢、易抖动等问题,提出了一种鲁棒的非奇异快速终端滑模控制方法。首先,建立工程车辆的运动学模型和位姿误差模型。考虑到传统终端滑模存在的奇异性问题,设计了积分型非奇异快速终端滑膜控制器,使系统误差在快速收敛的同时抑制了控制器的抖振。其次考虑到传统趋近律趋近速度慢等问题,基于反步法分别设计了线速度和角速度控制律,并选用fal函数和反双曲正弦函数组合来设计趋近律,提高了系统的稳定性和趋近速度并且削弱了滑模控制的抖振。最后在Matlab软件中和传统的非奇异终端滑模控制器控制效果进行对比实验仿真。实验结果表明,与传统的非奇异终端滑模控制器相比,本文提出的非奇异快速终端滑模控制策略在跟踪精度和不同运动的鲁棒性方面具有明显的优势。

**关键词:** 隧道工程车辆; 轨迹跟踪; 趋近律; 快速终端滑膜控制; 非奇异性

**中图分类号:** TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Trajectory tracking of tunnel engineering vehicles based on non-singular fast terminal sliding mode

Huang Taotao<sup>1</sup> Liu Fang<sup>2</sup> Song Zepeng<sup>1</sup>

(1. Graduate School of Tangshan, Southwest of Jiaotong University, Tangshan 063000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest of Jiaotong University, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low tracking accuracy, slow response speed and easy jitter in the track tracking and control method of construction vehicles, a robust non-singular fast terminal sliding mode control method is proposed. First, the kinematic model and posture error model of the construction vehicle are established. Considering the singularity problem of the traditional terminal sliding mode, an integral non-singular fast terminal sliding mode controller is designed, so that the system error can be quickly converged while suppressing the jitter of the controller. Secondly, considering the problems such as the slow approaching speed of the traditional approach law, the linear velocity and angular velocity control laws are designed based on the reverse footwork, and the combination of the fal function and the inverse hyperbolic sine function is selected to design the approach law, which improves the stability and approaching speed of the system and weakens the jitter vibration of the sliding mode control. Finally, the control effect of the traditional non-singular terminal sliding mode controller is compared and simulated in Matlab software. Experimental results show that compared with the traditional nonsingular terminal sliding mode controller, the nonsingular fast terminal sliding mode control strategy proposed in this paper has obvious advantages in tracking accuracy and robustness of different movements.

**Keywords:** tunnel engineering vehicle; trajectory tracking; approach law; fast terminal sliding mode control; nonsingularity

## 0 引言

高铁双线长大隧道的智能建造需要多类型、不同功能

的工程车辆协同运行。自动驾驶技术可实现工程车辆在隧道环境中的准确定位和有序作业。实现工程车辆的自动驾驶可有效加快隧道掘进进度、提高隧道建造质量、降低项目

成本、减少事故发生率<sup>[1]</sup>。轨迹跟踪控制作为自动驾驶的关键技术之一,一直是自动驾驶研究的热点。由于工程车辆具有非线性、多变量、模型参数不确定性的特点,在实际控制过程中还会受到外部扰动的影响,导致车辆难以追踪到参考轨迹。因此,为了得到更高精度,稳定性强收敛速度快的轨迹跟踪效果,对工程车辆控制系统选用一定鲁棒性的算法控制器具有重要的理论的研究意义<sup>[2]</sup>。

针对轨迹跟踪问题,为了实现鲁棒和准确的轨迹跟踪任务,国内外学者提出了大量的控制算法,包括滑模控制(SMC)<sup>[3-4]</sup>、神经网络控制<sup>[5]</sup>、模型预测控制<sup>[6]</sup>、纯追踪控制<sup>[7]</sup>等。Han 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于改进趋近律的双闭环滑模控制来实现 AGV 工程车辆的轨迹跟踪,加快了滑模控制系统的响应速度;Kumar 等<sup>[9]</sup>基于四轮机器人的运动学模型设计了 backstepping 跟踪控制器,使机器人能够有效地追踪到期望轨迹;Xuan 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于双层卷积神经网络与滑膜控制相结合的控制算法,实现了对跟踪目标高精度的跟踪;邓雄峰等<sup>[11]</sup>设计了一种鲁棒迭代学习控制算法,能够使系统快速保持稳定并且加快了跟踪误差的收敛速度;庞辉等<sup>[12]</sup>利用线性参数化理论将误差模型离散化处理,在模型预测控制框架中把轨迹跟踪问题转化成为了一个线性二次规划最优问题,提高了自主车辆轨迹跟踪的实时性和准确性;张丽君等<sup>[13]</sup>针对并联机器人的路径跟踪问题,设计了一种模糊比例-积分-微分控制器,当受到外界干扰时,显著提高了并联机器人的路径跟踪精度;然而对于实际的轨迹跟踪问题应用中,上述算法仍存在一定的局限性:神经网络控制需要大量的数据集,代价成本较高;迭代法和模型预测控制对硬件要求高,且计算耗时长,不能满足轨迹跟踪实时性的要求。而终端滑模控制(NTSM)由于本身的响应速度快,对系统参数变动即外界扰动不敏感等优点被广泛应用到车辆的轨迹跟踪问题研究中。但是传统的终端滑模控制在控制中容易存在奇异问题,且在有限时间内误差收敛慢等问题,进而使工程车辆轨迹跟踪控制器轨迹跟踪的结果有限。

对此,本文提出了一种积分型的快速非奇异终端滑模控制轨迹跟踪控制器(FNTSM),避免传统终端滑模容易出现奇异性的同时,提升了系统的跟踪精度;通过 fal 函数和反双曲正弦函数组合设计了一种新型趋近律,提高了滑模面的趋近速度并削弱了抖振现象,使工程车辆在具有任意初始位姿偏差的情况下都能追踪到参考轨迹。

## 1 隧道工程车辆的运动学建模

### 1.1 工程车辆运动过程分析

图 1 是依据隧道工程车辆具体参数搭建的比例实验小车模型,驱动轮位于两侧,左右两侧前后轮之间由直流伺服电机连接,通过轮间差速满足工程车辆不同的运动要求。假设该工程车辆以低速运动完成作业过程,忽略车辆的侧向滑动,车辆在运动的过程中不考虑侧向力,轮子与地面之

间不存在打滑现象,机构重心与其平面几何中心重合,则其简化模型如图 2 所示。

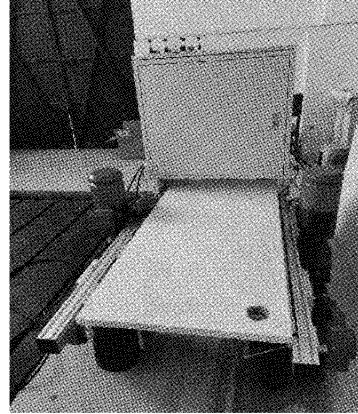


图 1 工程车辆实验小车

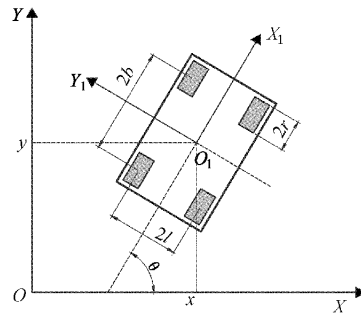


图 2 工程车辆的运动学模型

其中,  $X-O-Y$  是全局坐标系,表示工程装备在全局框架下所处的位置,  $X_1-O_1-Y_1$  是该装备的参考坐标系。  $\theta$  是装备本身与  $X$  轴的航向角,  $2b$  为装备前后轴距,  $2l$  为装备左右轮之间的轮距,车轮半径为  $2r$ ,装备左右轮的角速度分别为  $\omega_l$  和  $\omega_r$ ,其几何中心在  $X_1-O_1-Y_1$  坐标系下的线速度和角速度分别为  $v$  和  $\omega$ 。

依据上述假设条件,在装备参考坐标系  $X_1-O_1-Y_1$  下,有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{2}(\omega_r r + \omega_l r) \\ \dot{y}_1 = 0 \\ \dot{\theta} = \frac{r}{2l}(\omega_r - \omega_l) \end{cases} \quad (1)$$

进而得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{r}{2l} \begin{bmatrix} b & b \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (2)$$

在全局坐标系下,有:

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x}_1 \cos\theta - \dot{y}_1 \sin\theta \\ \dot{y} = \dot{x}_1 \sin\theta + \dot{y}_1 \cos\theta \\ \dot{\theta} = \frac{r}{2l}(\omega_r - \omega_l) \end{cases} \quad (3)$$

进而得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{r}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ \frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

在参考坐标系中,工程小车的线速度与左右轮角速度之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{l}{r} \\ \frac{1}{r} & \frac{l}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

所以,对于差速转向的工程装备,以几何中点作为参考点,在世界坐标系下,其连续的运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 1.2 位姿误差分析

为方便对工程车辆系统进行误差分析,建立了如图3所示的位姿误差分析图。其中,  $\mathbf{p}_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$  表示该工程装备在参考坐标系下的期望位姿,而  $\mathbf{p}_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T$  表示按照期望轨迹行进的实际位姿,则该系统的位姿误差表示为:

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e & 0 \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_s \\ y_r - y_s \\ \theta_r - \theta_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

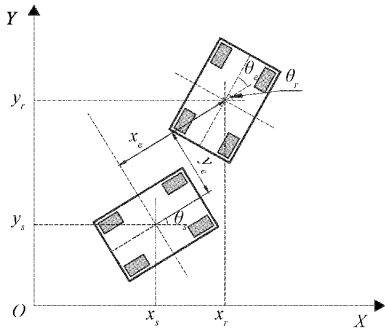


图3 工程车辆位姿示意图

对上式进行微分,并参考其连续的运动学微分方程,可以得到系统误差的微分方程:

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos\theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin\theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

为了使工程车辆能够追踪到参考轨迹,需要其位姿误差有界并趋向于0,即通过控制系统输入  $\mathbf{q} = [v, \omega]^T$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,对具有任意初始位姿偏差的工程车辆而言,都能使系统误差  $\mathbf{p}_e$  有界且不断趋向于0。

## 2 轨迹跟踪控制器的设计

### 2.1 算法流程

针对隧道环境下的智能工程车辆的轨迹跟踪控制问题,如图4所示,设计了一种基于积分型非奇异终端滑模滑模控制的鲁棒控制器,将某一时刻的参考轨迹的位姿与实际轨迹的位姿进行误差分析,然后将误差传递给轨迹跟踪控制器中,控制器通过传递设计能够满足跟踪要求的线速度和角速度,从而使该工程车辆能够实现对参考轨迹的跟踪。

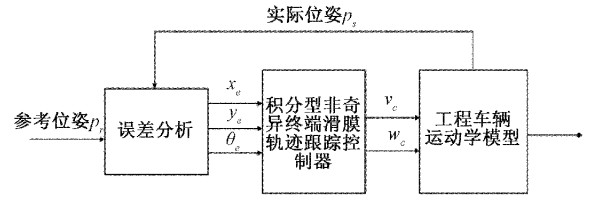


图4 轨迹跟踪算法流程

### 2.2 控制器的设计

反步法的基本思想是将复杂的非线性或线性系统能够分解成多个子系统,可以为每个子系统设立独立的Lyapunov函数,并引入中间虚拟变量以满足系统的稳定性,在多输入的非线性系统中得到了广泛的应用<sup>[14]</sup>。因此,选用反步法与滑模控制相结合来设计滑模面函数。

#### 1) 角速度控制律设计及稳定性分析

对于欠驱动的工程小车而言,由于角速度控制律不会产生奇异性,一般不需要对角速度控制律的滑模面切换函数进行微分。因此,本文选用了一种快速高效的终端滑模面切换函数来实现角速度的误差跟踪。结合式(8),角速度的误差微分方程为:

$$\dot{\theta}_e = \omega_r - \omega_s \quad (9)$$

其滑模面切换函数可设计为:

$$s_1 = \dot{\theta}_e + a_1 |\theta_e|^{\gamma_1} \text{sign}(\theta_e) + b_1 |\theta_e|^{q_1/p_1} \text{sign}(\theta_e) \quad (10)$$

式中:  $a_1, b_1$  均为正数,  $p_1, q_1, \gamma_1$  为大于1的正奇数。

通过控制系统输入,使  $s_1$  在有限时间内趋近于0,从而能使得  $\theta_e$  趋近于0,可得到控制律为:

$$\omega_e = \omega_r + a_1 |\theta_e|^{\gamma_1} \text{sign}(\theta_e) + b_1 |\theta_e|^{q_1/p_1} \text{sign}(\theta_e) \quad (11)$$

为了验证其控制系统的稳定性,选取Lyapunov函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \theta_e^2 \quad (12)$$

对式(12)求导得:

$$\dot{V}_1 = \theta_e (-a_1 |\theta_e|^{\gamma_1} \text{sign}(\theta_e) - b_1 |\theta_e|^{q_1/p_1} \text{sign}(\theta_e)) = -a_1 (\theta_e^2)^{(\gamma_1+1)/2} - b_1 (\theta_e^2)^{(q_0+p_0)/2p_0} \quad (13)$$

令  $\xi = \sqrt{(2V_1)}$ , 可使上式化简为:

$$\dot{\xi} = -a_1 |\xi|^{\gamma_1} \text{sign}(\xi) - b_1 |\xi|^{q_1/p_1} \text{sign}(\xi) \quad (14)$$

引理 1<sup>[15]</sup>: 考虑如下的非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -A |x|^{\alpha/\beta} \text{sign}(x) - B |x|^{n/m} \text{sign}(x), \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $\alpha, \beta, k, f$  均为非偶数的正数,  $\alpha > \beta, m > n$ , 则在有限的时间内状态量  $x$  会趋于渐近稳定。

依据引理 1 可知, 式(14)在有限时间内也会趋近于 0, 从而使角速度误差收敛于 0。

2) 线速度控制律设计及稳定性分析

针对式(8)所描述的误差微分方程, 采用积分型非奇异快速终端滑模控制方法, 对线速度控制律进行设计。

对于一般的二阶非线性系统而言, 有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + g(x, t)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (16)$$

定义状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = y_e \\ x_2 = -w_r x_e \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -w_r^2 y_e - \dot{w}_r x_e - w_r v_r + w_r v \end{cases} \quad (17)$$

考虑传统的终端滑模控制容易出现奇异问题, 并且为了保证跟踪误差的速度, 选取积分型非奇异快速终端滑模面来设计滑模面切换函数。

$$s_2 = x_2 + \int_0^t a_2 |x_1|^{\gamma_2} \text{sign}(x_1) + b_2 |x_1|^{q_2/p_2} \text{sign}(x_1) + a_3 |x_2|^{\gamma_3} \text{sign}(x_2) + b_3 |x_2|^{q_3/p_3} \text{sign}(x_2) dt \quad (18)$$

式中:  $a_2, b_2, a_3, b_3$  均为正数,  $p_2, q_2, p_3, q_3, \gamma_2, \gamma_3$  均为正奇数, 并且满足  $1 < p_2/q_2 < 2, 1 < p_3/q_3 < 2$ 。

为了证明其稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= a_2 \frac{1}{\gamma_2 + 1} |x_1|^{\gamma_2 + 1} + b_2 \frac{1}{q_2/p_2 + 1} |x_1|^{q_2/p_2 + 1} + \\ &\frac{1}{2} x_2^2 \end{aligned} \quad (19)$$

通过控制系统输入, 令滑模面切换函数  $s_2 = 0$ , 对式(18)求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= -a_2 |x_1|^{\gamma_2} \text{sign}(x_1) + b_2 |x_1|^{q_2/p_2} \text{sign}(x_1) - \\ &a_3 |x_2|^{\gamma_3} \text{sign}(x_2) - b_3 |x_2|^{q_3/p_3} \text{sign}(x_2) \end{aligned} \quad (20)$$

将式(20)代入到式(19)得其形式为:

$$\dot{V}_2 = -a_3 (x_2^2)^{(\gamma_3 + 1)/2} - b_3 (x_2^2)^{(q_3 + p_3)/2p_3} \quad (21)$$

由式(21)可知, 只要满足  $\gamma_3$  恒为正奇数,  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 在有限时间内  $x_2$  会收敛于 0,  $x_1$  也会收敛于 0。

为了加快滑模控制系统的响应速度, 削弱系统在滑模面的抖振现象, 本文选用了一种趋近速度更快的趋近律:

$$\dot{s}_2 = -k_1 s_2^{q/p} \text{fal}(s_2, \eta, \delta) - k_2 \text{arsh}(s_2) \quad (22)$$

其中:

$$\text{fal}(s_2, \eta, \delta) = \begin{cases} |s_2|^{\eta} \text{sign}(s_2) & (|s_2| > \delta) \\ \frac{s_2}{\sigma^{1-\eta}} & (|s_2| \leq \delta) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $\delta, \eta, \epsilon$  均为正数, 且  $0 < \delta < 1, \delta$  为 fal 函数在坐标轴原点附近正负对称线性段的区间长度。

该趋近律可以在不同的阶段起到分别增强主项的作用和削弱次项的作用, 当  $|s_2| \leq \delta$  时, 即  $s_2$  趋近于 0 时, 式(22)的第一项起主导作用, 能够使系统状态以较大的趋近速度接近于滑模面, 同时由于 fal 函数本身具有快速收敛的优点, 对于削弱系统的高频抖振具有重要的作用; 当  $|s_2| > \delta$  时, 式(22)的第二项占据主导作用, 其为连续函数, 也能保证系统快速趋近到滑模面。

将式(17)代入到式(22)经过化简可得线速度控制律为:

$$\begin{aligned} v_c &= v_r + \frac{\dot{w}_r}{w_r} x_e + w_r y_e - \frac{1}{w_r} (a_2 |x_1|^{\gamma_2} \text{sign}(x_1) + \\ &b_2 |x_1|^{q_2/p_2} \text{sign}(x_1) + a_3 |x_2|^{\gamma_3} \text{sign}(x_2) + \\ &b_3 |x_2|^{q_3/p_3} \text{sign}(x_2) + k_1 s_2^{q/p} \text{fal}(s_2, \eta, \delta) + k_2 \text{arsh}(s_2)) \end{aligned} \quad (24)$$

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = \frac{1}{2} s_2^2 \quad (25)$$

对式(25)求导并代入到(22)得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_1 s_2^{q/p+1} - k_2 s_2 \text{arsh}(s_2) = \\ &-k_1 2^{(q+1)/2p} (V_3)^{(q+1)/2p} - k_2 s_2 \text{arsh}(s_2) \end{aligned}$$

依据上式可知,  $V_3 \geq 0, \dot{V}_3 \leq 0$ , 系统是趋于稳定的。但是由线速度控制律可知, 倘若  $w_r = 0$ , 构造的二阶系统中, 有  $\dot{x}_1 = x_2 = 0$ , 即  $\dot{y}_e = 0$ , 式(24)的线速度控制率右端项则会产生奇异性, 其取值趋于无穷大。对此, 本文选用一种局部控制律来避免其结果的奇异性, 如下:

当  $w_r$  的取值范围位于 0 附近的区间内, 设计状态量为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = x_e \\ \varphi_2 = \theta_e + v_r y_e \end{cases} \quad (26)$$

通过控制系统输入, 当  $x_e$  取值为 0 时, 为证明其稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$V_4 = \frac{1}{2} y_e^2 \quad (27)$$

对式(27)进行求导, 且令  $\theta_e = -v_r y_e$ , 得如下形式:

$$\dot{V}_4 = y_e \dot{y}_e = v_r y_e \sin(\theta_e) = -v_r y_e \sin(v_r y_e) \quad (28)$$

若  $v_r y_e \in (-\pi, \pi)$ , 则  $\dot{V}_4 \leq 0$ , 其控制系统满足稳定性。因而, 综上考虑, 为使系统整体满足稳定性要求, 其控制律设计如下:

$$\begin{cases} w_c = (w_r + \dot{v}_r y_e + v_r^2 \sin(\theta_e)) + a_1 |z_2|^{\gamma_1} \text{sign}(z_2) + \\ b_1 |z_2|^{q_1/p_1} \text{sign}(z_2) + k_1 s_1^{q/p} \text{fal}(s_1, \eta, \delta) + \\ k_2 \text{arsh}(s_1) / (1 + v_r x_e) \\ v_c = w y_e + v_r \cos(\theta_e) + k_3 s_2^{q/p} \text{fal}(s_2, \eta, \delta) + k_4 \text{arsh}(s_2) \end{cases} \quad (29)$$

### 3 仿真结果分析

为了验证本文提出的非奇异快速终端滑模控制算法的有效性,通过 Matlab/Simulink 中搭建控制器模型,对工程车辆分别进行不同的轨迹跟踪仿真实验,并和传统的非奇异终端滑模控制算法轨迹跟踪结果,误差结果,控制器输入结果进行对比分析,从而评估本文提出控制算法的轨迹跟踪性能。

#### 3.1 直线型轨迹跟踪实验

首先选取一条直线作为参考轨迹,移动机器人期望轨迹的线速度和角速度可由以下公式计算可得:

$$v_r = \sqrt{\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2} \quad (30)$$

$$\omega_r = \dot{\theta}_r = \frac{\dot{x}_r \dot{y}_r - \dot{y}_r \dot{x}_r}{x_r^2 + y_r^2} \quad (31)$$

移动机器人期望轨迹的初始位姿为(0.5, 0.5, 0),实际轨迹的初始位姿设定为(0, 0.25, pi/3),轨迹跟踪控制器的仿真参数设置如表 1 所示,两种算法的直线轨迹跟踪结果和直线轨迹跟踪位姿误差如图 5 和 6 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
滑模面 $s_1$	$a_1 = 2, b_1 = 2, p_1 = 9, q_1 = 7, \gamma_1 = 2$
滑模面 $s_2$	$a_2 = 2, b_2 = 2, p_2 = 7, q_2 = 5, p_3 = 9,$ $q_3 = 7, \gamma_2 = 2, \gamma_3 = 3$
控制律	$\eta = 0.5, k_1 = 6, \delta = 0.02, k_2 = 6$ $p = 9, q = 7$

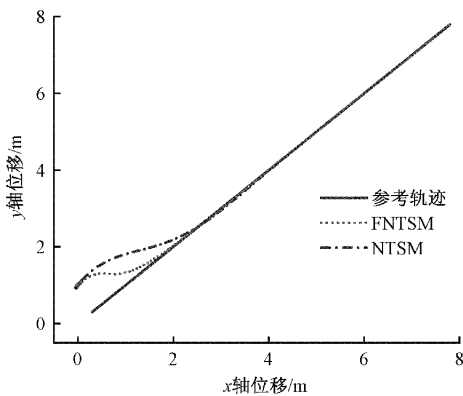


图 5 直线轨迹跟踪结果

由图 5 的轨迹跟踪结果可知,传统的终端滑模控制算法和本文改进的非奇异快速终端滑模控制算法在移动机器人本身具有初始位姿误差的情况下,都能较好的追踪到设定的直线参考轨迹。但是由图 6 可知,通过本文算法控制的隧道台车,在仿真时间达到 0.76 s 时,装备  $x$  轴横向偏差的绝对值小于 0.025 m;而传统终端滑模控制的工程车辆虽在 1.38 s 时,其  $x$  轴的横向偏差的绝对值小于 0.025 m,但系统会穿过滑模面,直至 4.73 s,才会满足误差要求。对

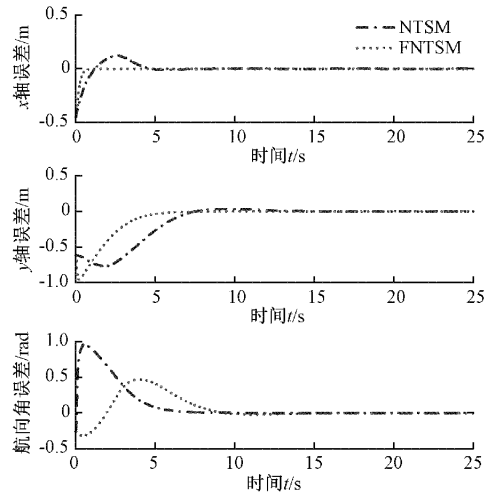


图 6 直线轨迹跟踪位姿误差对比结果

于  $y$  轴纵向偏差而言,传统的终端滑模控制算法和本文的改进非奇异终端滑模控制算法都能达到的较快的收敛,但传统终端滑模控制下的隧道工程车辆纵向误差的绝对值小于 0.02 m 时,所耗时长比本文控制算法高 3.43 s。由图 6 的航向角的误差分析结果可知,本文的控制算法在趋近速度上明显高于 NTSM,且前者的最大航向误差为 0.496 rad,后者的航向角误差最大值为 0.987 rad,前者的最大正向航向角误差仅为 NTSM 的 50.25%,并且达到误差绝对值小于 0.02 rad 的稳态所需的时间比 NTSM 少 3.76 s。并且由图 5 可以看出,本文的改进的积分型非奇异终端滑模控制在工程车辆追踪参考轨迹的速度上明显优于传统的非奇异终端滑模控制,本文的轨迹跟踪效果更好。

#### 3.2 曲线型轨迹跟踪实验

选定参考的曲线型轨迹选定为“U”型曲线,仿真参数如表 1 所示,隧道台车的线速度和角速度由式(30)和(31)计算可得。假定隧道台车的期望初始位姿为(-20, 4, 0),实际初始位姿为(-20, 0, pi/3),其实验结果如图 7~8 所示。

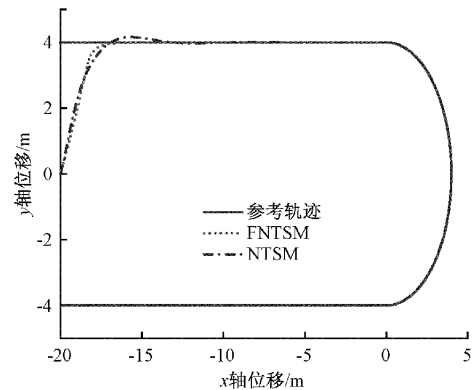


图 7 曲线型轨迹跟踪结果

从图 7 的轨迹跟踪结果可以看出,FNTSM 对于曲线轨迹的追踪效果也明显优于 NTSM,且本文的控制算法在

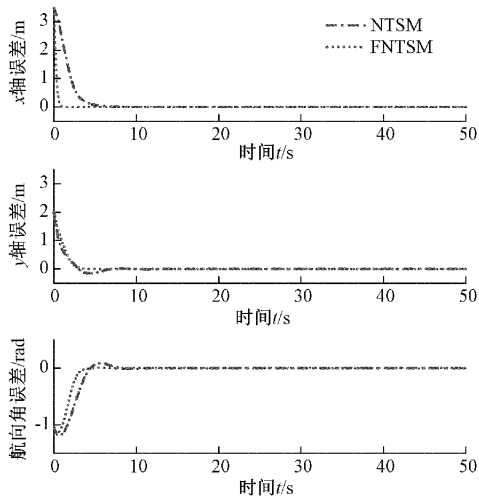


图 8 曲线型轨迹跟踪误差对比结果

$x$  轴位移为  $-7.05$  m 处,实际轨迹收敛于参考轨迹,传统的非奇异终端滑模控制算法则在横向位移达到  $-11.17$  m 时,实际行驶轨迹开始收敛并趋于平稳。由图 8 跟踪误差仿真结果可知,FNTSM 的  $x$  轴横向误差在  $1.19$  s 时,误差开始收敛并趋近于 0 值,而 NTSM 在  $6.38$  s 时,误差才开始随时间减小并趋近于 0,前者的趋近滑膜面的速度比后者快  $5.19$  s。对于  $y$  轴的纵向误差和航向角误差,前者 FNTSM 的误差趋近于稳态 0 值所用的时间分别为  $3.14$  s 和  $4.43$  s,而后者 NTSM 的趋近时间分别为  $7.63$  s 和  $8.33$  s,并且 FNTSM 的最大纵向偏差和航向角偏差均小于 NTSM。

因此,结合上述直线型轨迹和曲线型轨迹仿真结果来看,本文提出的积分型快速非奇异终端滑模控制算法相比于传统的非奇异终端滑模控制算法控制隧道台车,其趋近速度更快,对于参考轨迹的追踪效果也更优。

## 4 结 论

本文针对隧道工程车辆的轨迹跟踪问题,提出了一种基于积分型非奇异快速终端滑模控制算法。利用反步法分别对工程车辆的线速度和角速度控制律进行设计,基于 Lyapunov 稳定性理论证明了所设计控制器的稳定性。在控制律的设计中,选用了特殊幂次函数和反双曲函数组合的新型趋近律,提高了系统跟踪误差收敛于零点的趋近速度并降低了抖振。通过直线型和曲线型轨迹仿真实验对比结果表明,与传统的 NTSM 控制器相比,该控制器在鲁棒性和跟踪精度方面是明显占优的。

## 参考文献

- [1] 吕刚,刘建友,赵勇,等.京张高铁隧道智能建造技术[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1375-1384.
- [2] 于向军,槐元辉,姚宗伟,等.工程车辆无人驾驶关键技术[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(4):1153-1168.

- [3] 曹志斌,杨卫,邵星灵,等.基于快速终端滑模的机器人轨迹跟踪避障方法(英文)[J].Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(1):78-86.
- [4] 姜立标,吴中伟.基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J].农业机械学报,2018,49(3):381-386.
- [5] 吴方圆,姚江云.粒子群神经网络辨识的机器人分数阶滑模控制[J].电子测量技术,2019,42(9):10-13.
- [6] 齐贝贝,齐仲里,王林林.基于模型预测控制的自主水下航行器模糊回坞导引算法[J].国外电子测量技术,2020,39(4):37-41.
- [7] 陈龙,罗杰,杨旭,等.基于模糊纯追踪控制的自动泊车算法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2019,41(3):316-321.
- [8] HAN Y, CHENG Y, XU G. Trajectory tracking control of AGV based on sliding mode control with the improved reaching law[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20748-20755.
- [9] KUMAR U, SUKAVANAM N. Backstepping based trajectory tracking control of a four wheeled mobile robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(4): 38.
- [10] XUAN Y, ZHAO B C. Sliding mode control with deep learning method for rotor trajectory control of active magnetic bearing system [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control (S0142-3312), 2018, DOI:10.1177/0142331218778324.
- [11] 邓峰雄,余磊,魏利胜,等.输入受限下非完整轮式移动机器人迭代学习跟踪控制[J].电子测量与仪器学报,2021,35(9):58-64.
- [12] 庞辉,刘楠,刘敏豪,等.基于线性时变模型预测控制的自主车辆轨迹跟踪控制器设计与验证[J].机械工程学报,2022,58(24):264-274.
- [13] 张丽君,段昌盛,赫桂梅.基于改进模糊控制的并联机器人运动路径跟踪研究[J].传感器与微系统,2021,40(10):59-62.
- [14] 吴青云.非完整移动机器人的自适应滑膜轨迹跟踪控制研究[D].陕西:长安大学,2007.
- [15] TIE Z Z L. Distributed robust finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems [J]. International Journal of Systems Science, 2014,47(6): 1-10.

## 作者简介

黄陶陶,硕士研究生,主要研究方向为工程车辆的自动驾驶研究。

E-mail:1530497849@qq.com

刘放,工学博士,副教授,主要研究方向为轨道交通工程智能装备。

E-mail:498262864@qq.com

宋泽鹏,硕士研究生,主要研究方向为机器人感知与控制。

E-mail:893584724@qq.com