

四轮独立驱动移动机器人的动力学滑模转弯控制

陈 圣, 高国琴

(江苏大学 电气信息工程学院 江苏 镇江 212013)

摘 要:为解决四轮独立驱动移动机器人在转弯时易出现不稳定的问题,并提高其转弯性能,针对一种四轮独立驱动移动机器人,根据移动机器人各车轮转矩可单独控制的特点,首先,运用达朗贝尔原理建立以质心侧偏角和横摆角速度为状态变量的四轮独立转向动力学模型,然后,运用直接横摆力矩控制方法,设计以质心侧偏角和横摆角速度为控制系统状态变量的指数趋近律动力学滑模控制策略,以使移动机器人质心侧偏角控制在稳定范围内,且其横摆角速度能够很好地跟踪移动机器人期望运动轨迹。最后,通过基于 Matlab/Simulink 进行转向行驶控制仿真试验,结果表明,与前馈反馈控制方法相比,基于所建立动力学模型所设计滑模控制策略有效改善了移动机器人的转弯控制稳定性。

关键词: 动力学滑模控制; 移动机器人; 转弯控制; 四轮驱动

中图分类号: TH16; S24 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2014)09-0164-04

Dynamic Sliding Mode Turning Control for a Four-Wheel Independent Driving Mobile Robot

CHEN Sheng, GAO Guo-qin

(School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

Abstract In order to solve the instability problem of a four-wheel independent driving mobile robot when turning and improve its steering capability, based on the characteristics that the robot's each wheel torque can be separately controlled, the dynamic model of the four-wheel independent steering system of choosing the sideslip angle and the yaw rate as the state variables is firstly established by using the D'Alembert's principle. Then, an exponential approach law dynamic sliding mode control strategy of adopting the sideslip angle and the yaw rate as the joint control variables is designed by using the direct yaw torque control method in order to make the sideslip angle be in the stable range and make the yaw rate track the desired motion trajectory of the robot well. Finally, the simulation of the steering control using Matlab/Simulink is done. Compared with the feedforward-feedback control method, it is shown from the results that the designed sliding mode control strategy based on the dynamic model is effective to improve the turning control stability of the mobile robot.

Key Words Dynamic Sliding Mode Control; Mobile Robot; Turning Control; Four-Wheel Drive

1 引言

四轮独立驱动移动机器人依靠四轮独立转向的特点,可使所有车轮均绕着同一瞬时旋转中心转向,实现不同转向半径甚至零转向半径,使其在转向行驶时具有高度的灵活性^[1],但当地面处于潮湿,且凹凸不平时,对于处于一定速度下的四轮独立驱动移动机器人在转向行驶时极易出现动力学不稳定的状态,造成四轮独立转向移动机器人的受控性降低,出现转向不足或转向过度,从而导致机器人侧滑失控^[2],以致毁坏周围环境及机器人本身,造成严重损失。因此,有必要研究四轮独立驱动移动机器人的转弯控制问题,即转向稳定性问题。

近年来对于移动机器人的跟踪控制问题国内外学者进行了较广泛的研究^[3-5],而对于其转向稳定性问题的研究目前尚少。在研究移动机器人转向运动稳定性控制时,首先利用理想的线性模

型预测移动机器人的期望运动状态,其实际横摆角速度由传感器获取,实际侧偏角度则通过传感器信号及各种估算算法(包括 kalman 滤波器、神经网络、移动机器人的真实精确模型等)得到,然后将预测状态和实际测出的结果进行对比,基于差值进行控制^[6]。主要的控制方法是基于反馈理论的常规控制,利用现代控制理论实现更高性能稳定性控制的研究则有待于进一步开展。目前,可借鉴用于轮式移动机器人转向运动稳定性控制、针对电动车的转向稳定控制策略主要有:反馈控制^[7]、模糊控制^[8]、前馈反馈控制等。

针对应用于四轮独立驱动移动机器人转向稳定性控制问题,首先运用达朗贝尔原理建立以质心侧偏角和横摆角速度为状态变量的四轮独立转向动力学模型。考虑到与依赖于动力学模型准确性的前馈反馈控制等方法以及难以实时实现的智能控制方

来稿日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375210); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政发[2011]6号);

镇江市科技支撑项目(GY2013062、NY2011013)

作者简介: 陈 圣(1988-)男,江苏镇江人,硕士研究生,主要研究方向:移动机器人的运动控制;

高国琴(1965-)女,江苏扬州人,教授,博士生导师,主要研究方向:并联机构及其装备的控制

法相比,动力学滑模控制器无需建立精确数学模型,不仅动态性能好,鲁棒性强,能有效解决非线性系统控制问题,而且易于设计和实现,因此基于质心侧偏角和横摆角速度与期望值的误差,运用滑模变结构控制理论,采用指数趋近律滑模控制策略实现使移动机器人的质心侧偏角接近于零、使横摆角速度高性能跟踪期望值的控制目标,从而有效提高移动机器人的转向稳定性。

2 移动机器人动力学分析

2.1 四轮独立驱动移动机器人动力学模型

移动机器人运动坐标系^[8]如图1所示。 x_R-C-y_R 为固定于移动机器人质心的附体坐标系, x_R 轴沿车体纵向对称线方向, y_R 轴垂直于移动机器人前进方向, z 轴为垂直于地面向上的方向;全局坐标系 XOY 为移动机器人运动的绝对坐标系,其原点固结于大地。

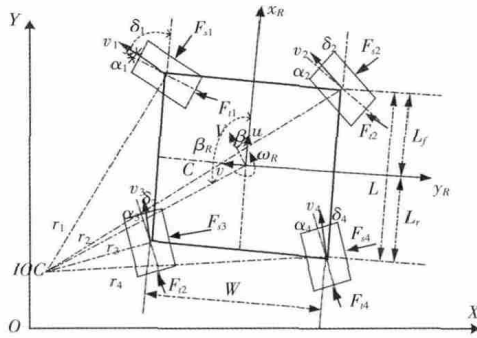


图1 移动机器人运动坐标系

Fig.1 The Coordinate System of the Mobile Robot

在移动机器人附体坐标系中 $F_{xi}, F_{yi}(i=1, 2, 3, 4)$ 分别为路面通过轮子分别沿 x_R 和 y_R 方向加在机器人上的力, u, v 分别为机器人径向和侧向速度, ω_R 为移动机器人质心的横摆角速度, $\delta_i(i=1, 2, 3, 4)$ 与 $\alpha_i(i=1, 2, 3, 4)$ 分别为四个转向车轮的转向角与侧偏角, β 为移动机器人的质心侧偏角,移动机器人左右轮轮距为 W ;轴距为 L ,质心至前轴与后轴的距离分别为 L_f 和 L_r 。

根据达朗贝尔原理及图1所示的机器人受力情况,考虑四轮移动机器人结构的刚性,并忽略侧倾运动,建立四轮独立驱动移动机器人动力学模型如式(1)、式(2)、式(3)所示:

$$m a_x = \sum_{i=1}^4 F_{xi} - \frac{1}{2} C_D A_f \rho_a u^2 \quad (1)$$

$$m a_y = \sum_{i=1}^4 F_{yi} \quad (2)$$

$$I_z \dot{\omega}_R = L_f (F_{y1} + F_{y2}) - L_r (F_{y3} + F_{y4}) + \frac{W}{2} (F_{x2} + F_{x4}) - \frac{W}{2} (F_{x1} + F_{x3}) \quad (3)$$

式中 m —移动机器人的总质量(kg); $\frac{1}{2} C_D A_f \rho_a u^2$ —空气阻力; C_D —机器人空气阻力系数; A_f —移动机器人前投影面积(m^2); ρ_a —空气密度($kg \cdot m^{-3}$); u_x 与 u_y —移动机器人质心绝对加速度在附体坐标系 x_R 轴与 y_R 上的分量; I_z —机器人绕过质心垂线的转动惯量($kg \cdot m^2$); $F_{xi}(i=1, 2, 3, 4)$ —车轮上沿轴的力; $F_{yi}(i=1, 2, 3, 4)$ —车轮上沿轴的力。

2.2 以质心侧偏角和横摆角速度为状态变量的系统动力学模型

由于机器人径向速度 v 和侧向速度 u 较小,可得出移动机器人质心绝对加速度在 $C-y_R$ 轴上的分量 a_y :

$$a_y = \dot{v} + u \omega_R = u(\dot{\beta} + \omega_R) \quad (4)$$

将式(4)分别代入式(2)与式(3),同时考虑在移动机器人运动时,其车轮转角 δ 一般较小,由此产生的质心侧偏角也较小,可取 $\cos \delta_i \approx 1$, $\sin \delta_i \approx 0$ 经整理可得:

$$\dot{\beta} = \frac{1}{mu} \left[K_1 \left(\beta + \frac{L_f \omega_R}{u} - \delta_1 \right) + K_2 \left(\beta + \frac{L_f \omega_R}{u} - \delta_2 \right) + K_3 \left(\beta - \frac{L_r \omega_R}{u} - \delta_3 \right) + K_4 \left(\beta - \frac{L_r \omega_R}{u} - \delta_4 \right) \right] - \omega_R \quad (5)$$

$$I_z \dot{\omega}_R = L_f \left[K_1 \left(\beta + \frac{L_f \omega_R}{u} - \delta_1 \right) + K_2 \left(\beta + \frac{L_f \omega_R}{u} - \delta_2 \right) - L_r \left[K_3 \left(\beta - \frac{L_r \omega_R}{u} - \delta_3 \right) + K_4 \left(\beta - \frac{L_r \omega_R}{u} - \delta_4 \right) \right] \right] + \frac{W}{2} (F_{x2} + F_{x4}) - \frac{W}{2} (F_{x1} + F_{x3}) \quad (6)$$

式(5)、式(6)即为以质心侧偏角和横摆角速度为状态变量的移动机器人系统动力学模型,式中 K_i —移动机器人车轮侧偏力和侧偏角的比例系数,可以通过先求得移动机器人的侧向力和侧偏角线性模拟求得; F_{xi} —移动机器人车轮的纵向力; $M = \frac{W}{2} (F_{x2} + F_{x4}) - \frac{W}{2} (F_{x1} + F_{x3})$ —由移动机器人纵向力产生的横摆力矩。

2.3 移动机器人理想模型

考虑研究采用动力学滑模控制,无需建立精确数学模型,因此根据文献^[9]可将理想模型简化成一阶系统的形式,得到移动机器人质心侧偏角和横摆角速度的期望值模型为:

$$\dot{\beta}_d = 0 \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_{Rd} = \frac{k_\omega}{\tau_\omega (1 + \tau_\omega)} + \frac{a_{22} (b_{11} \delta_1 + b_{12} \delta_2 + b_{13} \delta_3 + b_{14} \delta_4)}{a_{12}} \quad (8)$$

上两式中:

$$a_{11} = \frac{1}{mu} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) \quad a_{12} = \frac{1}{mu^2} [L_f (K_1 + K_2) - L_r (K_3 + K_4)] - 1$$

$$a_{21} = \frac{L_f (K_1 + K_2) - L_r (K_3 + K_4)}{I_z u} \quad a_{22} = \frac{L_f^2 (K_1 + K_2) + L_r^2 (K_3 + K_4)}{I_z u}$$

$$b_{11} = -\frac{K_1}{mu} \quad b_{12} = -\frac{K_2}{mu} \quad b_{13} = -\frac{K_3}{mu} \quad b_{14} = -\frac{K_4}{mu}$$

$$b_{21} = -\frac{K_1 L_f}{I_z} \quad b_{22} = -\frac{K_2 L_f}{I_z} \quad b_{23} = \frac{K_3 L_r}{I_z} \quad b_{24} = \frac{K_4 L_r}{I_z}$$

$$\tau_\omega = \frac{a_{12}}{a_{22} b_{11} + k_{21} a_{22} b_{12} + k_{31} a_{22} b_{13} + k_{41} a_{22} b_{14}} k_\omega$$

其中 K_{21}, K_{31}, K_{41} 反映四个轮子转角之间的几何关系,可由

图1得到。

3 移动机器人控制系统设计

3.1 控制系统构建

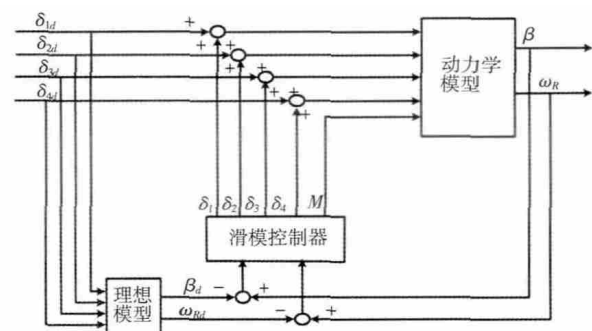


图2 移动机器人动力学滑模控制方框图

Fig.2 Block Diagram of Dynamic Sliding Mode Control for Mobile Robot

作为被控对象 移动机器人不仅具有高度非线性特性 而且通常工作在不确定外部扰动环境中 因此传统控制方法如反馈控制、计算力矩法等往往难以获得较好的运动控制效果。针对移动机器人的转弯控制问题 提出一种基于动力学滑模控制的四轮独立转向控制策略 控制系统方框图 如图 2 所示。

设移动机器人控制系统状态变量为 $x=[\beta \ \omega_R]^T$ 控制量为 $u=[\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4 \ M]^T$ 输入向量为 $\delta_d=[\delta_{1d} \ \delta_{2d} \ \delta_{3d} \ \delta_{4d}]^T$ 输出向量为 $Y=[\beta \ \omega_R]^T$ 则其状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M \end{bmatrix}$$

3.2 滑模面设计

系统状态误差定义如下:

$$e=[e_\beta \ e_{\omega_R}]^T$$

其中 $e_\beta=\beta-\beta_d$ $e_{\omega_R}=\omega_R-\omega_{Rd}$ 。

设计滑模切换面函数为:

$$s=cce \quad (9)$$

式中 c —正系数 p —系统误差 系统状态到达滑模面时系统动态性能完全由滑模面决定。

3.3 指数趋近律滑模控制器设计

采用指数趋近律滑模控制策略,不仅可以缩短趋近运动的时间 提高移动机器人转弯控制的快速性 还可以使运动点到达滑模面时的速度较小 提高移动机器人转弯控制的平稳性。对于单纯的指数趋近 由于其趋近过程是一个渐进的过程 不能保证在有限时间内到达 设计增加一个等速趋近项 如式(10)所示 使得 s 趋近于 0 时 趋近运动的速度为 ε 而不是 0 以保证系统运动点在有限时间内到达切换面 进一步提高移动机器人转弯控制的实时性。

$$\frac{d}{dt}s=-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)-Ks \quad \varepsilon>0 \quad (10)$$

式中 $\frac{d}{dt}s=Ks$ —指数趋近项 $\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ —列向量 ε 、 K —对角阵。则

根据指数趋近律控制理论 有:

$$\frac{d}{dt}s_j=c_j \begin{bmatrix} \dot{e}_\beta \\ \dot{e}_{\omega_R} \end{bmatrix} = -\varepsilon_j \operatorname{sgn}(s_j) - k_j s_j \quad (11)$$

根据上一节系统动力学模型中得到的质心侧偏角和横摆角速度的微分方程跟期望值进行比较 得偏差方程代入式(11)中可得:

$$\begin{cases} z_1 \delta_1 + h_1 \delta_2 + g_1 \delta_3 + t_1 \delta_4 + j_1 M = \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 s_1 - f_1 \\ z_2 \delta_1 + h_2 \delta_2 + g_2 \delta_3 + t_2 \delta_4 + j_2 M = \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 s_2 - f_2 \\ z_3 \delta_1 + h_3 \delta_2 + g_3 \delta_3 + t_3 \delta_4 + j_3 M = \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(s_3) + k_3 s_3 - f_3 \\ z_4 \delta_1 + h_4 \delta_2 + g_4 \delta_3 + t_4 \delta_4 + j_4 M = \varepsilon_4 \operatorname{sgn}(s_4) + k_4 s_4 - f_4 \\ z_5 \delta_5 + h_5 \delta_2 + g_5 \delta_3 + t_5 \delta_4 + j_5 M = \varepsilon_5 \operatorname{sgn}(s_5) + k_5 s_5 - f_5 \end{cases}$$

因此可得到控制量 $(\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \delta_4 \ M)$ 为:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ M \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 s_1 - f_1 \\ \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 s_2 - f_2 \\ \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(s_3) + k_3 s_3 - f_3 \\ \varepsilon_4 \operatorname{sgn}(s_4) + k_4 s_4 - f_4 \\ \varepsilon_5 \operatorname{sgn}(s_5) + k_5 s_5 - f_5 \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} z_1 & h_1 & g_1 & t_1 & j_1 \\ z_2 & h_2 & g_2 & t_2 & j_2 \\ z_3 & h_3 & g_3 & t_3 & j_3 \\ z_4 & h_4 & g_4 & t_4 & j_4 \\ z_5 & h_5 & g_5 & t_5 & j_5 \end{bmatrix}$$

3.4 四轮移动机器人驱动力分配

在滑模控制过程中 由于横摆力矩 M 不能直接作为控制量输入给电机 这时要设计驱动力分配控制器 将 M 作为输入 合理分配各个驱动电机的驱动力或制动力 以满足横摆力矩的要求。

设 F_{di} ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为作用在轮子的等效驱动力和运动阻力 可知 $F_{ti}=F_{di}-F_{fi}$ 。

四轮移动机器人牵引力产生的横摆力矩为:

$$M_{fd} = \frac{W}{2} (F_{t2} + F_{t4}) - \frac{W}{2} (F_{t1} + F_{t3}) \quad (12)$$

驱动力的分配不仅要考虑满足横摆力矩 而且还要满足移动机器人加速的要求。对于进行作业的移动机器人 可不考虑空气阻力 则有:

$$ma_x = F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} \quad (13)$$

移动机器人在前进的过程中 为避免出现滑转 车轮的驱动力受地面附着力的限制 即:

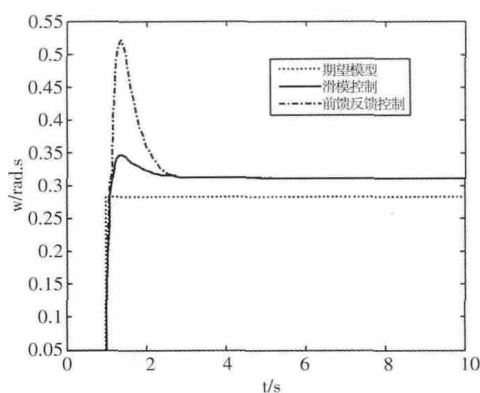
$$F_{ti} \leq F_{\phi i} = \phi F_{Ni} \quad (14)$$

式中 $F_{\phi i}$ —车轮的最大附着力 ϕ —附着系数。

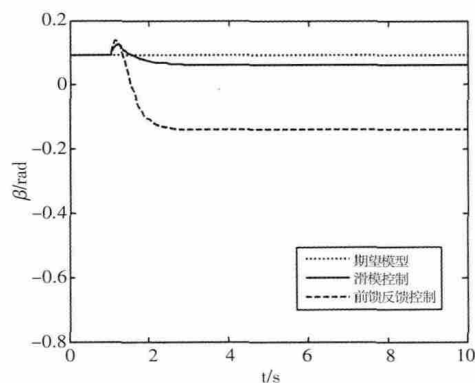
根据式(12)和式(13)计算移动机器人车轮的牵引力和制动力 然后采用线性叠加的方法 即可分配车轮的驱动力 并保证满足不等式(14)。

4 仿真实验

为验证所设计动力学控制策略的有效性 基于 Matlab/Simulink 仿真平台 针对指数趋近律滑模控制和前馈反馈控制对四轮移动机器人转向稳定性的控制作用 分别进行了仿真试验。仿真时 移动机器人保持前进 车速恒定。移动机器人参数 $m=130.5\text{kg}$ 前轮到质心距离 $L_f=0.3\text{m}$ 后轮到质心距离 $L_r=0.26\text{m}$ 。仿真试验中移动机器人的前进速度取为 2m/s 在匀速行驶 1s 时输入转角信号。四轮移动机器人质心侧偏角和横摆角速度在输入 0.2rad 的阶跃转角时的响应曲线 如图 3 所示。图 3 中对比了指数趋近律滑模控制和前馈反馈控制响应。在前馈反馈控制作用下 其横摆角速度经过 0.23s 的过渡时间达到稳定 且与期望值的稳态误差为 0.1rad/s 其质心侧偏角与理想模型的稳态误差为 0.2rad 而在滑模控制作用下 横摆角速度在 0.13s 达到稳定状态 与理想模型的稳态误差为 0.1rad/s 其质心侧偏角与理想模型的稳态误差为 0.03rad 。



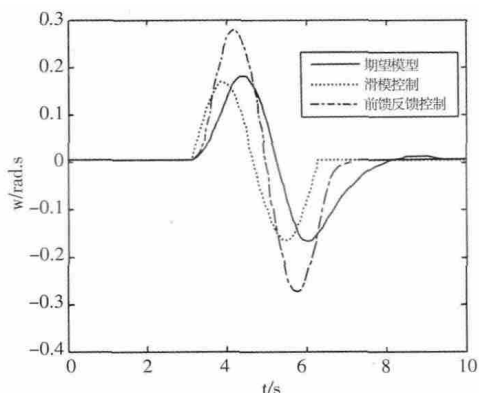
(a)



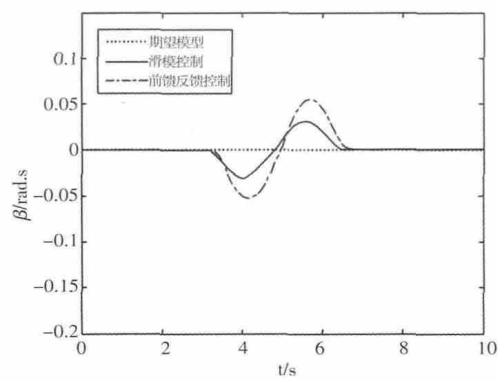
(b)

图3 阶跃输入下横摆角速度和质心侧偏角控制响应
Fig.3 The Control Responses of the Yaw Rate and the Sideslip Angle in a Step Input

当移动机器人转向运动时,其瞬心位置和转弯半径不时发生变化,此时,用给转角一个固定的阶跃信号,不能完全验证移动机器人转向控制策略的性能,借鉴ISO标准中汽车操纵稳定性的试验评价方法,即正弦转角输入的方法对移动机器人的动力学滑模控制策略进行评价分析。仿真时,设移动机器人的前进速度为2m/s,在匀速直线行驶3s后,输入幅值为0.1rad的正弦转向角信号。正弦转角输入下的移动机器人质心侧偏角和横摆角速度响应如图4所示。由图4可见,以前馈反馈控制时,其横摆角速度与期望值的最大误差为0.14rad/s,此时质心侧偏角 β 与期望值的最大误差为0.05rad;采用指数趋近律滑模控制时,横摆角速度与期望值的最大误差为0.01rad/s,质心侧偏角与期望值的最大误差为0.03rad,与前馈反馈控制作用相比,明显改善了移动机器人转向时的行驶稳定性。



(a)



(b)

图4 正弦输入下的横摆角速度和质心侧偏角控制响应
Fig.4 The Control Responses of the Yaw Rate and the Sideslip Angle in a Sinusoidal Input

5 结论

针对应用于四轮独立驱动移动机器人的转弯控制问题,建立了移动机器人的转向运动系统动力学模型和理想模型,以移动机器人的质心侧偏角和横摆角速度为控制系统状态变量,提出一种指数趋近律动力学滑模控制策略,并基于Matlab/Simulink进行仿真试验。结果表明,与前馈反馈控制作用相比,指数趋近律动力学滑模控制能够较好地实现对移动机器人转向时的质心侧偏角和横摆角速度的控制,具有较好的瞬态和稳态响应性能,有效提高了移动机器人的转弯控制稳定性。

参考文献

- [1] Yun Y, Hongpeng W, Jintai L. The kinematic analysis and simulation for four-wheel independent drive mobile robot [C]//Control Conference (CCC), IEEE, 2011(30): 3958-3963.
- [2] 费晓曦. 多轮独立驱动轮式移动机器人驱动控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
(Fei Xiao-xi. research on the driving control of wheeled mobile robots with multiple independently driven wheels[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011).
- [3] 南景富, 刘延斌, 牛广林. 轮式移动机器人的路径规划和跟踪控制[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 131-133.
(Nan Jing-fu, Liu Yan-bin, Niu Guang-lin. Path programming and tracking control of wheeled model moved robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(8): 131-133.)
- [4] Adib Yaghmaie Farnaz, Bakhshande Fateme, Taghirad Hamid D. Feedback error learning control of trajectory tracking of nonholonomic mobile robot [C]// ICEE Iranian Conference on Electrical Engineering, 2012(20): 889-893.
- [5] Sharbafi M A, Lucas C, Daneshvar R. Motion control of omni-directional three-wheel robots by brain-emotional-learning-based intelligent controller [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2010, 40(6): 630-638.
- [6] 孙龙龙, 付宜利. 四轮独立转向移动机器人动力学建模及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
(Sun long-long, Fu Yi-li. Dynamics and control of four-wheel-independent-steering mobile robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008).
- [7] Gu D, Hu H. Neural predictive control for a car-like mobile robot [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 39(2): 73-86.
- [8] Shino M, Nagai M. Independent wheel torque control of small-scale electric vehicle for handling and stability improvement [J]. JSAE Review, 2003(24): 449-456.