

基于滑膜干扰抑制的两轮小车自平衡控制算法^{*}

陈运胜 范运活

(广州华立科技职业学院 广州 511325)

摘要: 新型滑板两轮小车在野外作业和城市道路巡逻等方面具有重要的应用价值,对两轮小车自平衡控制保证小车稳定可靠性运行的关键。由于两轮小车的轮动控制系统是一个多输入多输出的非线性强耦合系统,在不平稳道路中容易产生抖振。在常规的滑膜控制的基础上,引入一个非线性滑膜切换面误差跟踪项,通过滑膜干扰抑制抖振,提出一种基于滑膜干扰抑制的两轮小车自平衡控制算法。构建了两轮小车的运动状态方程和平衡控制参量分析模型,通过非线性滑膜切换面误差跟踪进行滑膜自平衡控制律设计,加入非线性取代积分项补偿小车抖振,提高小车平衡控制系统的鲁棒性。仿真结果表明,采用该控制算法对两轮小车进行自平衡控制过程中,具有较好的平衡性能,输出的姿态误差减少,小车的稳定性较好,实现了对两轮小车的自平衡控制和调节,且调节作用是长期,持续的,有效保障了两轮小车的稳定运行。

关键词: 滑膜;干扰抑制;两轮小车;平衡控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Self balancing control algorithm of two wheeled vehicle based on inhibition of synovial interference

Chen Yunsheng Fan Yunhuo

(Guangzhou Huali Science and Technology Vocational College, Guangzhou 511325, China)

Abstract: The new type of two wheeled car in the field work and urban road patrol has important application value, the two wheeled vehicle self balancing control to ensure the stability of the car is the key to stable operation. As a result of the two wheel drive control system is a multi input multi output nonlinear strong coupling system, in the unstable road prone to shake. On the basis of conventional synovial control, a nonlinear sliding mode switching surface error tracking is introduced, and a two wheeled self balancing control algorithm is proposed, which is based on the suppression of the interference of the synovial membrane. The motion state equation and equilibrium control parameter analysis model of two wheeled vehicle was constructed. The model of the control law was designed by nonlinear sliding mode control law, and the nonlinear integral compensation was added to compensate the car chattering and improve the robustness of the car balance control system. Simulation results show that the proposed control algorithm has good performance in balancing the two wheeled vehicle, the output of the attitude error is reduced, the stability of the car is better, and the self balancing control and regulation of two wheeled vehicle is realized.

Keywords: synovial membrane; interference suppression; two wheeled car; balance control

1 引言

新型滑板车采用两轮轮动设计,通过自带电源提供电力,实现快速移动,新型滑板两轮小车无论是作为未来的智能儿童玩具还是作为交通工具来讲,都具有重要的应用前景,特别是在城市道路巡逻和野外草原或者沙漠作业中,两轮小车具有灵活轻便和耗能低等优点,受到了相关应用

界的广泛关注。两轮小车作为一种多参量输入输出(MIMO)的非线性强耦合系统,在滑动过程中容易受到地面摩擦力和惯性力等因素的影响,导致失衡,为了提高小车的稳定性和舒适性,需要对两轮小车进行自平衡控制,研究两轮小车的自平衡控制算法,在提高两轮小车的可靠性和稳定性方面具有重要意义,相关的控制算法研究受到了人们的广泛关注。

收稿日期:2015-10

^{*} 基金项目:2015年度广东大学生科技创新培育专项资金立项项目(pdjh2015b0885)资助

传统方法中,对两轮轮动系统的控制方法主要有基于模糊神经网络控制的小车平衡控制方法、基于滑膜积分的两轮小车平衡控制算法和基于能量制导控制的车平衡控制方法等。由于两轮小车的非线性和强耦合特性,导致小车在不平稳道路中容易产生抖振,传统的控制方法会产生平衡误差,导致小车失衡和对路面的适应能力降低,对此,相关文献进行了控制算法的改进设计^[1-3]。文献[4]提出一种基于自适应平均加权的两轮移动摇摆小车的轮动控制方法,采用相空间重构方法进行轮动系统的自由角度控制,提高了小车的稳定性,但是当小车的角度和角速度出现不规则变化时,控制性能不好;文献[5]提出一种基于纵向定常运动分析的两轮小车自平衡控制算法,采用限定初始状态积分控制对小车的机动性进行滑膜补偿,降低了平衡误差,但是算法的计算开销较大,随着输入参量的增大,导致控制系统的实时性不好^[6-8]。针对上述问题,本文提出一种基于滑膜干扰抑制的两轮小车自平衡控制算法。算法在常规的滑膜控制的基础上,引入一个非线性滑膜切换面误差跟踪项,通过滑膜干扰抑制抖振,首先构建了两轮小车的平衡控制参量模型,然后进行滑膜控制律设计,通过加入非线性取代积分项补偿小车抖振,提高小车平衡控制系统的鲁棒性,仿真实验进行了性能验证,展示了本文方法在进行两轮小车自平衡控制中的优越性能,对两轮小车的抖振和稳态误差都具有较好的抑制作用,控制精度较高,平衡性能较好,得出有效性结论。

2 两轮小车数学模型和自平衡控制参量分析

2.1 两轮小车运动状态数学模型

两轮小车采用的是两轮平衡制导方法实现独立滑行,为了实现对两轮小车的平衡控制,需要首先构建两轮小车的平衡控制数学模型,采用经典力学方法^[9-10],对两轮小车的运动空间分为速度坐标系 $Ox_3y_3z_3$ 、体坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 、轮动坐标系 $Ox_2y_2z_2$ 和地面坐标系 $Axyz$ 。两轮小车的双轮质心为坐标系原点 O ,速度坐标系 $Ox_3y_3z_3$ 该坐标系原点 O 取在两轮小车的质心上,体坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 与两轮小车耦合的,坐标原点 O 取在两轮小车的质心上,构建两轮小车运动的质心动力学方程:

$$m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin\theta \quad (1)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = Y \cos\gamma_V - Z \sin\gamma_V - mg \cos\theta - mV \cos\theta \frac{d\psi_V}{dt} = Y \sin\gamma_V + Z \cos\gamma_V \quad (2)$$

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} - J_{xy} \frac{d\omega_y}{dt} + (J_z - J_y) \omega_z \omega_y + J_{zy} \omega_x \omega_z = M_x \quad (3)$$

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} - J_{xy} \frac{d\omega_x}{dt} + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z + J_{xy} \omega_x \omega_y = M_y \quad (4)$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x + J_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) = M_z \quad (5)$$

其中:

$$\frac{dx}{dt} = V \cos\theta \cos\psi_V \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin\theta \quad (7)$$

$$\frac{dz}{dt} = -V \cos\theta \sin\psi_V \quad (8)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma \quad (9)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\cos\vartheta} (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma) \quad (10)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_x - \tan\vartheta (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma) \quad (11)$$

$$\sin\beta = \cos\theta [\cos\gamma \sin(\psi - \psi_V) + \sin\vartheta \sin\gamma \cos(\psi - \psi_V)] - \sin\theta \cos\vartheta \sin\gamma \quad (12)$$

$$\sin\alpha = \{ \cos\theta [\sin\vartheta \cos\gamma \cos(\psi - \psi_V) - \sin\gamma \sin(\psi - \psi_V)] - \sin\theta \cos\vartheta \cos\gamma \} / \cos\beta \quad (13)$$

$$\sin\gamma_V = (\cos\alpha \sin\beta \sin\vartheta - \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma \cos\vartheta + \cos\beta \sin\gamma \cos\vartheta) / \cos\theta \quad (14)$$

以上各式中, m 为两轮小车的总质量; P 为车轮的惯性矩; θ 为两轮小车纵向运动倾角,它表示为横滚速度矢量 (Ox_2 轴) 与地球坐标系夹角; α 为横向摇摆角,两轮小车质心的速度矢量 (Ox_3 轴) 在两轮小车纵向对称面 Ox_1y_1 上的正交空间与 Ox_1 轴具有扰动性,若 Ox_1 轴位于纵向运动的侧向水平夹角内,则 α 为正,反之为负; X, Y, Z 表示两轮小车在平衡地面运行的阻力、侧向力和摩擦力; M_x, M_y, M_z 为分别横滚力矩、小车的侧向力矩和定常力矩; J_x, J_y, J_z 分为小车的轮动体系回旋转动惯量; x, y, z 为质心位置,两轮小车的纵轴 (Ox_1 轴) 与水平面 (Ox_2y_2 平面) 间的夹角为一个二阶线性系统; ψ_V 为车体绕摆杆旋转的角速度; e_1 为控制系统误差。通过上述两轮小车的运动状态数学模型构建,得到了两轮小车的运动状态方程,以此为基础进行平衡控制。

2.2 两轮小车自平衡控制原理和参量分析

在上述两轮小车的运动动力学分析和数学模型构建的基础上,进行两轮小车的自平衡控制^[11-13],假设两轮小车运动在平面上,小车运动的轮动自平衡约束条件描述为:

$$X_{RL} = R \times \theta_{RL} \quad (15)$$

$$X_{RR} = R \times \theta_{RR} \quad (16)$$

$$X_{RL} - X_{RR} = D \times \delta \quad (17)$$

$$X_P = X_{RM} + L \sin\theta_P \quad (18)$$

$$\dot{X}_P = \dot{\theta}_P L \cos\theta_P + \dot{X}_{RM} \quad (19)$$

$$Y_P = L \cos\theta_P \quad (20)$$

$$\dot{Y}_P = -\dot{\theta}_P L \sin\theta_P \quad (22)$$

$$X_{RR} + X_{RL} = 2X_{RM} \quad (23)$$

式中: R 表示车轮半径; L 为表示两轮小车的轨迹偏差; D

为两轮轴线间的距离; K_m 、 K_e 表示电动势系数; M_P 、 M_R 分别表示质量; $J_R = J_{RL} = J_{RR}$ 、 $J_{P\theta}$ 、 $J_{P\phi}$, 假设两轮小车为一个 n 阶稳态多输入多输出(MIMO)系统, 系统的状态方程描述如下:

$$\mathbf{y}^{(n)} = f(\mathbf{y}^{(n-1)}, \dots, \dot{\mathbf{y}}, t) + \Delta f(\mathbf{y}^{(n-1)}, \dots, \dot{\mathbf{y}}, t) + d(t) + b(\mathbf{y}^{(n-1)}, \dots, \dot{\mathbf{y}}, t)u \quad (24)$$

式中: $\mathbf{y} \in R^m$ 为小车自平衡控制的周期运动输出矢量; $f \in R^m$ 为扰动函数, $u \in R^m$, $b \in R^m$, 满足 $\text{rank}(b) = m$; Δf 和 $d(t)$ 分别小车轮动系统自平衡控制的稳态常数和干扰项, 并且满足:

$$|\Delta f(\mathbf{X}, t)| \leq F(\mathbf{X}, t), |d(t)| \leq D(t) \quad (25)$$

为了分析方便分析, 在小车移动过程中, 取 $J_{P\theta}|_{\theta_i=0}$ 来代替 $J_{P\theta}$ 。令 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, \dots, x_n = y^{(n-1)}$, 得到两轮小车自平衡运动的等幅振荡势能 T 和动能 V 。

$$T = \frac{1}{2}M_{RL}\dot{X}_{RL}^2 + \frac{1}{2}M_{RR}\dot{X}_{RR}^2 + \frac{1}{2}J_{RL}\dot{\theta}_{RL}^2 + \frac{1}{2}J_{RR}\dot{\theta}_{RR}^2 \quad (26)$$

$$V = M_P g L \cos\theta_p \quad (27)$$

当车轮在做纯滚动的情况下, 小车的运动状态方程可改写为 MIMO 形式, 为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_n = f(\mathbf{X}, t) + \Delta f(\mathbf{X}, t) + d(t) + b(\mathbf{X}, t)u \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T = [x_1^T, \dot{x}_1^T, \dots, x_1^{(n-1)T}]^T$, 在平衡运动状态小, 对小车的力矩系数进行了线性化处理, 车体的状态 δ , $\dot{\delta}$ 与状态 $X_{RM}, V_{RM}, \theta_P, \omega_P$ 具有互扰动性, 通过上述描述, 实现了对两轮小车自平衡控制的参量分析。

3 滑膜干扰抑制设计和小车自平衡控制律改进

3.1 非线性滑膜切换面误差跟踪

在上述运动状态方程设计和运动参量描述的基础上, 对小车进行自平衡控制, 对两轮小车自平衡控制保证小车

$$p_i(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} e_i(0)^{(k)} t^k + \sum_{j=0}^n \left(\sum_{l=0}^n \frac{a_{ij}}{T^{j-l+n+1}} e_i(0)^{(l)} \right) \cdot t^{j+n+1}, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (34)$$

式中: a_{ij} 为阻尼力矩的特征解, 通过引入滑膜积分项, 实现非线性滑膜切换面误差跟踪。

3.2 两轮小车自平衡滑膜控制律改进实现

通过上述分析, 引入一个非线性滑膜切换面误差跟踪项, 进行自平衡控制^[13], 当滑膜变量在边界层外时, 小车自平衡控制的滑膜面方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(\mathbf{X}, t) &= \mathbf{C}\dot{\mathbf{E}} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{P}}(t) = \\ \mathbf{C} \cdot [\dot{e}^T \ddot{e}^T \dots e^{(n)T}]^T - \mathbf{C} \cdot [\dot{p}^T(t) \ddot{p}^T(t) \dots p^{(n)}(t)^T]^T &= \\ \mathbf{C}_n [e^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} \mathbf{C}_k [e^{(k)} - p^{(k)}(t)] &= \end{aligned}$$

稳定可靠性运行的关键。由于两轮小车的轮动控制系统是一个多输入多输出的非线性强耦合系统, 在不平稳道路中容易产生抖振。本文对此进行了算法改进, 在常规的滑膜控制的基础上, 引入一个非线性滑膜切换面误差跟踪项, 通过滑膜干扰抑制抖振^[14], 两轮小车的滑膜切换面状态 $\mathbf{X} = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T = [x_1^T, \dot{x}_1^T, \dots, x_1^{(n-1)T}]^T$, 在有限的时间内小车自稳定的偏差距离为: $\mathbf{X}_d = [x_{1d}^T, x_{2d}^T, \dots, x_{nd}^T]^T = [x_{1d}^T, \dot{x}_{1d}^T, \dots, x_{1d}^{(n-1)T}]^T$, 采用滑膜跟踪控制方法进行外部有界干扰抑制, 设计一个高效的控制律如下。定义两轮小车自平衡状态下的动能为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d = [e^T, \dot{e}^T, \dots, e^{(n-1)T}]^T \quad (29)$$

式中: $\mathbf{e} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d} = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$, 那么滑膜面方程在平衡点附近的误差矢量为:

$$\sigma(\mathbf{X}, t) = \mathbf{C}\mathbf{E} - \mathbf{C}\mathbf{P}(t) \quad (30)$$

式中: $\mathbf{C} \in R^{n \times m}$ 表示两轮小车周期等幅振荡矩阵, 且 $C_{i,j}$ ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 都为常量; $\mathbf{P}(t) = [p(t)^T, \dot{p}(t)^T, \dots, p^{(n-1)}(t)^T]^T$, 当 $p(t) = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t)]^T$ 且满足 $p_i(t)$, 得到两轮小车在抖振下的自激振荡幅度为:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-DK_m K_e b_0}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m b_0 \end{bmatrix} \mathbf{U}_0 \quad (31)$$

假设, $p_i(t): R_+ \rightarrow R, p_i(t) \in C^n[0, \infty), \dot{p}_i, \dots, p_i^{(n)} \in L^\infty$ 。选取滑膜面的等效控制律为:

$$u_{eqx} = \lambda(-\dot{f}_x - \lambda x \dot{e}_x - \alpha e_x + \ddot{x}) / (\lambda g_x + g_\theta) \quad (32)$$

$$u_{eq\theta} = (-\dot{f}_\theta - \lambda \theta \dot{e}_\theta - \beta e_\theta + \ddot{\theta}_d) / (\lambda g_x + g_\theta) \quad (33)$$

存在某个常数 $T > 0$, $p_i(t)$ 是在滑膜面 $[0, T]$ 上有确定解的, 并且 $p_i(0) = e_i(0), \dot{p}_i(0) = \dot{e}_i(0), \dots, p_i^{(n)}(0) = e_i^{(n)}(0)$, 当 $t = T$ 时, 振幅比值 $p_i(t), \dot{p}_i(t), \dots, p_i(t)^{(n)}$ 都为 0, $i = 1, 2, \dots, m$ 。 $C^n[0, \infty)$ 为 $[0, \infty)$ 上所有 n 阶阻尼力矩, 得到小车自平衡的恢复力矩 $p_i(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_n [x_1^{(n)} - x_{1d}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} \mathbf{C}_k [e^{(k)} - p^{(k)}(t)] &= \\ \mathbf{C}_n [\dot{x}_n - x_{nd}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} \mathbf{C}_k [e^{(k)} - p^{(k)}(t)] &= \\ \mathbf{C}_n [f(\mathbf{X}, t) + \Delta f(\mathbf{X}, t) + b(\mathbf{X}, t)u + d(t) - x_{nd}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} \mathbf{C}_k [e^{(k)} - p^{(k)}(t)] &= \end{aligned} \quad (35)$$

若两轮移动小车处于两个不同初始状态的平面上运动, 边界层厚度为 μ , 设计 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma$ 进行 Lyapunov 泛函, 在 $t = T$ 时, 加入非线性取代积分项补偿小车抖振, 设计得到的滑膜控制器为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f_\theta(\mathbf{X}, t) + g_\theta(\mathbf{X}, t)u(t) + d_\theta(t) \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_x(\mathbf{X}, t) + g_x(\mathbf{X}, t)u(t) + d_x(t) \end{cases} \quad (36)$$

式中: $\mathbf{X} = [\theta, x, \dot{\theta}, \dot{x}]^T$, $f_x(\mathbf{X}, t)$, $f_\theta(\mathbf{X}, t)$, $g_x(\mathbf{X}, t)$, $g_\theta(\mathbf{X}, t)$ 可以确定系统的 Terminal 滑模面^[16]。

在小车自平衡状态下,两轮小车为一个二阶单摆系统,找到一个适合的控制规则,使得小车稳定运行,引入一个滑膜积分项,进行干扰抑制,此时的滑膜控制器设计为:

$$u(t) = -b(x, t)^{-1} [f(\mathbf{X}, t) - x_{1d}^{(n)} - p(t)^{(n)} + C_n^{-1} \sum_{k=1}^{n-1} C_k (e^{(k)} - p(t)^{(k)})] - b(x, t)^{-1} \frac{C_n^T \sigma}{\|C_n^T \sigma\|} [F(\mathbf{X}, t) + D(t) + K] \quad (37)$$

式中: K 为正整数,表示两轮小车的恢复力矩和阻尼力矩的误差比值,对上式进行求积分,得到:

$$\dot{V} \leq \|\sigma^T C_n\| \|\Delta f(\mathbf{X}, t) + d(t)\| - \frac{\sigma^T C_n C_n^T \sigma}{\|C_n^T \sigma\|} [F(\mathbf{X}, t) + D(t) + K] \quad (38)$$

在限定初始状态下,若外界干扰为常值,通过滑膜干扰抑制,由于 $\sigma^T C_n C_n^T \sigma = \|C_n^T \sigma\|^2$, 则:

$$\dot{V} \leq \|C_n^T \sigma\| \{ \|\Delta f(\mathbf{X}, t) + d(t)\| - [F(\mathbf{X}, t) + D(t)] \} - K \|C_n^T \sigma\| = \|C_n^T \sigma\| \{ \|\Delta f(\mathbf{X}, t)\| - F(\mathbf{X}, t) + [\|d(t)\| - D(t)] \} - K \|C_n^T \sigma\| \leq -K \|C_n^T \sigma\| < 0 (\|\sigma\| \neq 0) \quad (39)$$

通过上述设计的 Terminal 滑模面方程,实现了对两轮小车的自适应自平衡控制,且对不确定性干扰参数具有较好的抑制作用。

4 仿真实验与结果分析

为了测试本文控制算法在实现两轮小车自平衡控制中的性能,进行仿真实验,实验建立在 MATLAB 7.0 仿真软件基础上,仿真中两轮小车质量设定为 32 kg,重心平衡参数为 309.98 rad/s,地面摩擦力矩为 978 N · s,两轮小车系统初始状态为: $\mathbf{X} = [0.3 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 小车纵向运动的偏转角度为 0.4 rad(18°)。在上述仿真环境和初始条件设定的基础上,进行两轮小车的自平衡控制仿真,分别在有滑膜控制器和无滑膜控制器两种方案下进行小车的平衡控制仿真实验,以小车平衡控制的输出动能、控制姿态输出误差和控制输出电压为测试指标,得到仿真结果如图 1 所示。

从图 1 可知,采用本文方法,在常规的滑膜控制的基础上,引入一个非线性滑模切换面误差跟踪项,通过滑膜干扰抑制抖振,在构建了两轮小车的平衡控制参量模型的基础上,通过滑膜控制律设计,通过加入非线性取代积分项补偿小车抖振,提高小车平衡控制系统的鲁棒性,输出结果可见,采用本文方法进行小车自平衡控制,小车的稳定性较好,控制姿态输出误差降低,实现了对两轮小车的自平衡控制和调节,且调节作用是长期,持续的,有效保障

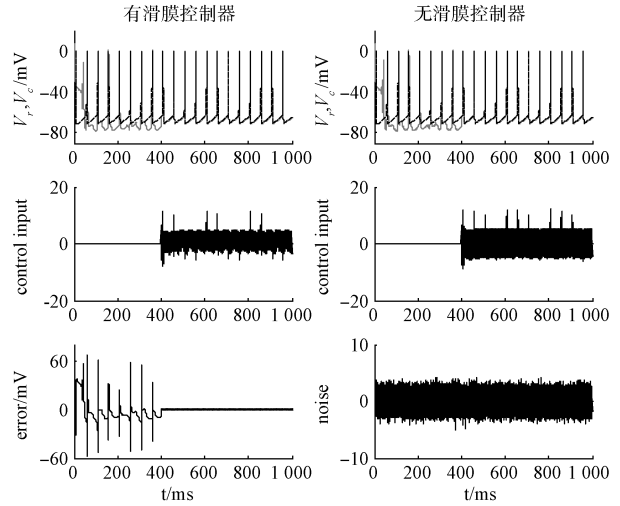


图 1 两轮小车自平衡控制仿真效能对比

了两轮小车的稳定运行。

5 结 语

两轮小车作为一种多参量输入输出(MIMO)的非线性强耦合系统,在滑动过程中容易受到地面摩擦力和惯性力等因素的影响,导致失衡,为了提高小车的稳定性和舒适性,需要对两轮小车进行自平衡控制,本文提出一种基于滑膜干扰抑制的两轮小车自平衡控制算法。算法在常规的滑膜控制的基础上,引入一个非线性滑模切换面误差跟踪项,通过滑膜干扰抑制抖振,构建了两轮小车的运动方程和平衡控制参量分析模型,然后进行滑膜控制律设计,通过加入非线性取代积分项补偿小车抖振,提高小车平衡控制系统的鲁棒性。实验研究和仿真分析得出,采用本文方法对两轮小车进行自平衡控制,对小车的抖振和稳态误差都具有较好的抑制作用,姿态误差减少,控制精度较高,平衡性能较好,展示了较好的应用价值。

参考文献

- [1] 葛立志. 基于全弹道控制分析的水下航行器攻击模型视景仿真[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(3): 137-141.
- [2] 赵石磊, 郭红, 刘宇鹏. 基于轨迹跟踪的线性时滞系统容错控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(4): 469-473.
- [3] XU S, LAM J, ZHANG B, et al. A new result on the delay-dependent stability of discrete systems with time-varying delays [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24 (16): 2512-2521.
- [4] ROTONDO D, PUIG V, NEJJARI F, et al. A fault-hiding approach for the switching quasi-LPV fault tolerant control of a four-wheeled omnidirectional mobile robot [J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2014, 99(1): 1-11.
- [5] 张霖, 欧林林, 俞立. 执行能力有限的两差动轮机器人目标跟踪控制器[J]. 信息与控制, 2015, 44(2): 152-158.
- [6] 黄伟国, 顾超, 尚丽, 等. 基于轮廓分层描述的目标识别算法研究[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 854-861.
- [7] 邹胜宇, 刘振, 高海波, 等. 基于干扰力时间积分的悬吊漂浮物随动控制方法[J]. 机器人, 2015, 37(1): 1-8, 16.
- [8] 王磊, 刘海涛, 梁滔, 等. 低频伺服力激励下进给系统建模与动态响应分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 18-28.
- [9] 索中英, 程嗣怡, 袁修久, 等. 优势决策信息系统规则获取方法及应用[J]. 兵工学报, 2015, 26(3): 539-544.
- [10] 黄文卿, 张兴春, 张幽彤. 一种交流逆变器死区效应半周期补偿方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 24-29.
- [11] 周勇, 甘新年. 鱼雷制导控制系统多通道控制加权算法设计[J]. 现代电子技术, 2014, 37(19): 14-17.
- [12] 张冀, 徐科军. 自动生成转速参考曲线的电动执行器定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1222-1234.
- [13] 张志文, 袁久兴. 基于 EPGA 和 AVR 单片机的惯组电源板信号检测[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 78-83.
- [14] 姚文轩, 滕召胜, 唐求, 等. 非同步采样下电力系统相量测量修正算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1518-1524.
- [15] 程桂芳, 丁志帅, 慕小武. 自治非光滑时滞系统的有限时间稳定[J]. 应用数学学报, 2013, 36(1): 14-21.
- [16] 彭丽英. 改进滑膜干扰控制律交通数据反步融合算法[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 515-519.

作者简介

陈运胜, 1982 年出生, 本科, 讲师, 主要研究方向: 机械工程、自动控制。

范运活, 1994 年出生, 在读学生, 主要研究方向为机械设计制造技术。

NI 推出 7 位半数字万用表 (DMM)

PXI Express 数字万用表, 为更精准更智能的测试系统奠定基础

2016 年 6 月 16 日-NI(美国国家仪器公司, National Instruments, 简称 NI)作为致力于为工程师和科学家提供解决方案来帮助他们对全球最严峻工程挑战的供应商, 近日宣布推出 NI PXIe-4081 7 1/2 位数字高性能万用表和 1.8 MS/s 的隔离数字化仪。NI PXIe-4081 是 PXI Express 数字万用表, 为从消费电子产品行业到航天航空与国防等各行各业的工程师开发高难度应用所需的智能测试系统提供了出色的灵活性、分辨率和隔离性能。

NI PXIe-4081 是精准的 7 1/2 位数字万用表, 为直流电压测量提供了行业领先的 15 ppm 精度, 校准后精度有效期长达两年。它的电压测量范围可从几纳伏到一千伏特, 电阻测量范围从微欧姆到千兆欧姆。固态分流器配置提供了 1 μ A~3A 范围内的 8 个直流电流量程以及 100 μ A 到 3A 范围内的 6 个交流均方根电流量程。

该数字万用表仅占用一个 3U PXI 插槽, 为高通道数系统提供理想的通道密度, 在单个 PXI 机箱的 4U 机架空间内提供 17 个数字万用表通道。为了满足高处理能力应用的需求, 隔离数字化仪模式能够以 1.8 MS/s 的最大采样率采集所有电压和电流量程内的直流耦合波形。通过改变数字化仪的采样率, 工程师们可以进行 10 位到 23 位的数字化仪分辨率调节, 以实现速度和精度的完美结合。

工程师可利用与传统工具一样易用的交互式软件前面板进行基本测量和调试自动化应用。驱动程序包括一流的编程界面, 能够配合多种开发环境使用, 如 C, Microsoft .NET 和 LabVIEW。驱动程序还提供帮助文件、文档说明和 28 个可立即运行的范例程序来辅助测试代码开发。