

一种面向应用的电动车窗防夹控制算法研究^①

罗婉丽¹, 吴晓燕²

1. 四川旅游学院 信息技术系, 成都 610100; 2. 四川文理学院 计算机学院, 四川 达州 635000

摘要: 为避免人和物在电动车窗玻璃上升过程中被夹伤, 研究了一种面向工程应用的电动车窗防夹控制算法. 首先应用滑模估计器对电动车窗不确定的外部扰动力矩进行估计, 然后根据实验确定摩擦力矩的特性, 并结合频谱分析结果, 探讨了将摩擦力矩从估计出的外部扰动力矩中分离出来的方法, 提高了对路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩的估计精度, 进而给出了一种新的车窗防夹算法. 实验结果表明, 该方法可行、有效, 具有计算速度快、易于实现、占用内存少等优点, 便于工程应用.

关键词: 夹紧识别; 滑模估计器; 力矩估计; 摩擦力矩

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2015)1-0096-06

汽车电动车窗防夹是为防止车窗自动上升时夹伤乘员而开发的技术, 主要解决车窗自动上升时的障碍物识别问题, 使车窗对障碍物最大夹紧力小于规定的数值^[1]. 目前, 国内外已有很多关于障碍物识别的相关研究, 多数是通过检测障碍物的力矩、电流、转速变化快慢来达到识别的目的^[2]. 近几年来, 许多先进的控制算法出现, 也出现了部分关于汽车电动车窗防夹控制算法的研究成果, 如模糊控制^[3]、鲁棒控制^[4]、自适应控制^[5]等控制策略. 但是这些研究大都进行了理想的假设, 事实上具体到每一个车时, 车窗受到的摩擦力矩是不同的, 并且环境温度的变化以及机构磨损和老化也会导致摩擦力矩的波动^[6-7]. 路面干扰力矩是由于汽车行驶在波动路面上, 路面的颠簸沿着轮胎、悬架传递到车窗机构面产生的, 其波动幅度和频率与路面状况密切相关. 障碍物施加的阻挡力矩是随机的, 力矩的大小、时间和作用方式都是不确定的^[8-9]. 由于这些方法没有考虑到摩擦力的干扰, 而在实际中摩擦力是不稳定的, 因此会给系统的判断造成影响, 并且这类基于力矩变化率的障碍物识别方法无法识别阻挡力矩缓慢增加的障碍物. 因此, 相关的研究大都基于理想假设和仿真研究, 没有进行实物模拟仿真实验, 有些算法复杂度很高, 也难以应用于工程实际.

在实际工程应用中, 一般情况下复杂的控制系统都是非线性的. 因此, 如鲁棒控制、自适应控制等算法被广泛应用于工程实践中. 为了解决这些问题, 本文应用滑模估计技术直接对车窗不确定的外部扰动力矩进行估计, 并通过实验分析摩擦力矩的特性, 确定对摩擦力矩的补偿方法, 通过实验我们将摩擦力矩从系统中分离出来, 这样就避免了摩擦力矩在系统识别中的影响.

1 问题描述

汽车车窗升降过程中, 可能受到的外部力矩有摩擦力矩、路面干扰力矩、障碍物阻挡力矩等^[3-4]. 车窗摩擦力识别系统可简化为图 1. 图 1 中, v, i, ω 分别代表系统识别中的驱动电压、电枢电流、电机角速度; 系统中的 K_e, K_t, R, L, J 分别代表电压常数、力矩常数、电枢电阻、电枢电感和驱动电机的转动惯量; T_f, T_r, T_p 分别表示折算到电机轴上的摩擦力矩、路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩.

车窗电机的力矩和电压平衡方程分别为

① 收稿日期: 2014-01-02

基金项目: 四川省教育厅 2014 年度一般项目(14ZB0315).

作者简介: 罗婉丽(1981-), 女, 四川自贡人, 讲师, 主要从事网络工程、信息安全及网络编程研究.

$$K_t i = J \frac{d\omega}{dt} + T_f(\omega) + T_r + T_p \quad (1)$$

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \omega \quad (2)$$

其中, 电机的角速度 ω 和电流 i 是可测量的, 摩擦力矩 T_f , 路面干扰力矩 T_r 以及障碍物阻挡力矩 T_p 都无法直接测量。

具体到每一个车时, 车窗受到的摩擦力矩是不同的, 并且环境温度的变化以及机构磨损和老化也会导致摩擦力矩的波动。路面干扰力矩是由于汽车行驶在波动路面上, 路面的颠簸沿着轮胎、悬架传递到车窗机构面产生的, 其波动幅度和频率与路面状况密切相关。障碍物施加的阻挡力矩是随机的, 力矩的大小、时间和作用方式都是不确定的。

本文讨论如何根据电机转速和电流测量信息对车窗不确定的外部扰动力矩进行估计的方法, 为了提高系统对障碍物的识别, 笔者从估计的干扰力矩中将摩擦力矩分离出来, 以提高对路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩的估计精度。

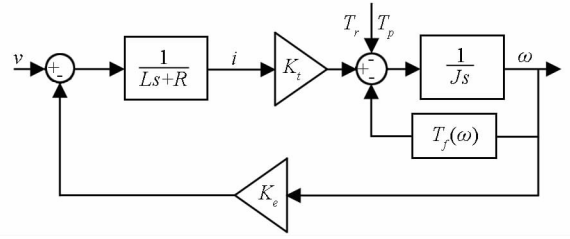


图 1 等效车窗模型

2 扰动力矩的滑模估计与防夹算法

2.1 估计模型

选取状态变量 $x = [\omega \ i]^T$, 式(1) 和(2) 的状态空间描述

$$\dot{x} = Ax + Bu + Pd \quad (3)$$

$$y = Cx \quad (4)$$

其中, $u = v$, 输出 y 是可测量的, $d = T_f(\omega) + T_r + T_p$ 是系统不确定的未知输入, d 的物理意义表明它是有界的。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_t}{J} \\ -\frac{K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

基于系统的状态空间描述, 电动车窗不确定的外部扰动力矩的估计问题, 可以描述为对线性不确定系统的未知输入估计问题。

2.2 滑模估计器设计

如果系统的未知输入关于测量输出是可观测的, 那么应用滑模估计技术, 系统可以自动地重构系统的未知输入^[10]。

对于系统, 由于 (A, C) 是可观测的, 且 $\text{rank}(CP) = 1$, 因此系统的未知输入关于测量输出是可观测的。设计滑模估计器

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) + Pv \quad (5)$$

$$v = -(C_1 P)^{-1} \rho \text{sign}(C_1 \hat{x} - C_1 X) \quad (6)$$

上式中, L, ρ 分别代表系统的反馈增益阵和系统的滑模增益, 同时 C_1 是从 C 中分离出来的矩阵, 其中 $C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$ 。

通过式(3)、式(5) 和估计误差 $e = \hat{x} - x$, 我们可以得到估计误差的自适应方程

$$\dot{e} = (A - LC)e + Pv - Pd \quad (7)$$

定义滑模面

$$e_1 = C_1 e = 0 \quad (8)$$

根据式(6), 式(7) 和式(8), e_1 的误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= C_1(A - LC)e + C_1 Pv - C_1 Pd = \\ &C_1(A - LC)e - \rho \text{sign}e_1 - C_1 Pd \end{aligned} \quad (9)$$

定义 Lyapunov 函数, 则

$$\dot{V} = e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T [C_1(A - LC)e - C_1Pd] - \rho \|e_1\| \quad (10)$$

因此, 通过选择滑模增益 ρ , 使之满足以下条件

$$\rho > \|C_1(A - LC)e - C_1Pd\| \quad (11)$$

由此得到 $\dot{V} < 0$. 这样 e 就能维持在滑模状态.

这样式(9)就变成如下形式

$$v_{eq} = d - (C_1P)^{-1}C_1(A - LC)e \quad (12)$$

因此, 等效控制

$$v_{eq} = d - (C_1P)^{-1}C_1(A - LC)e \quad (13)$$

将式(13)代入式(7), 可获得在滑模面上的误差动态方程

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A - LC)e + P[d - (C_1P)^{-1}C_1(A - LC)e] - Pd = \\ &[A - LC + P(C_1P)^{-1}C_1(A - LC)]e = \\ &[1 - P(C_1P)^{-1}C_1](A - LC)e \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $[1 - P(C_1P)^{-1}C_1] \geq 0$, 这样改变 L , 就可以使 $(A - LC)$ 达到一种稳定的状态, 由此可以使估计器进入实际的评估状态.

一旦系统到达滑模面, 并且所有的状态都收敛到系统真实的状态之后, 有

$$e \rightarrow 0, \Rightarrow [(C_1P)^{-1}C_1(A - LC)]e \rightarrow 0 \quad (15)$$

基于式(13), 我们可以根据式(6)中的 v 来估计未知输入

$$\hat{d} \approx -(C_1P)^{-1} \rho \text{sign}(C_1\hat{x} - C_1X)_{eq} = J\rho \frac{\dot{\omega} - \omega}{|\dot{\omega} - \omega| + \delta} \quad (16)$$

未知输入的估计精度与式(16)中的 δ 有关.

2.3 摩擦力矩的处理

应用前面方法估计出的外部扰动力矩包括摩擦力矩、路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩, 其中路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩难以分离. 为了提高对路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩的估计精度, 本节讨论摩擦力矩的分离方法.

由于实际车窗的摩擦特性不均匀, 以及环境温度变化、机构磨损和老化导致橡皮条的摩擦特性变化, 使得摩擦力矩呈非线性和不确定特性^[11-12].

由于摩擦力矩难以直接测量, 故实验时通过测量车窗电机电流和转速并根据式(1)间接获得. 在环境温度 25 °C 时的计算结果如图 2 所示. 图 2 中摩擦力矩的波动来源于车窗不同位置的摩擦系数不同和测量噪声, 为减少测量噪声的影响, 在 MATLAB/SIMULINK 环境下对去掉直流分量之后的摩擦力矩进行了频谱特性分析, 结果如图 3 所示. 根据摩擦力矩频谱分析结果, 设计了带宽为 5 Hz 的 FIR 低通滤波器以消除摩擦力矩中的高频扰动. 图 4 是滤波前后摩擦力矩的对比曲线. 滤波后得到的摩擦力矩名义值将从估计出的外部扰动力矩中分离出来, 以减少摩擦力矩对障碍物阻挡力矩的影响. 由于环境温度变化、机构磨损和老化产生的摩擦力矩的波动归结到障碍物阻挡力矩中.

2.4 防夹算法

防夹算法的基本思想是应用滑模估计器估计车窗的外部扰动力矩, 并根据实验确定摩擦力矩的特性, 设计滤波器和摩擦力矩的名义值, 设定障碍物阈值并从估计力矩中分离出摩擦力矩, 然后将分离之后的结果与我们之前设定的阈值进行比较, 这样我们就可以判断出是否有障碍物. 障碍物识别门限值可根据系统对灵敏度和可靠性的设计要求确定.

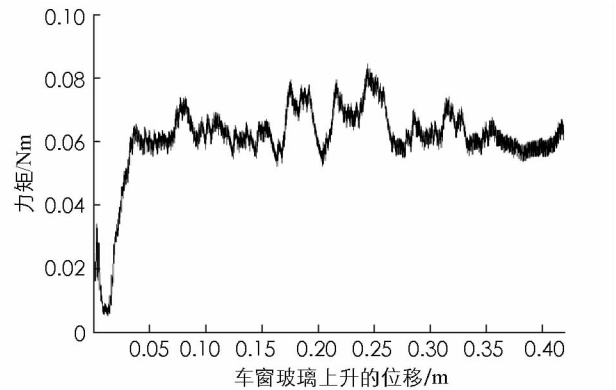


图 2 摩擦力矩的波动情况

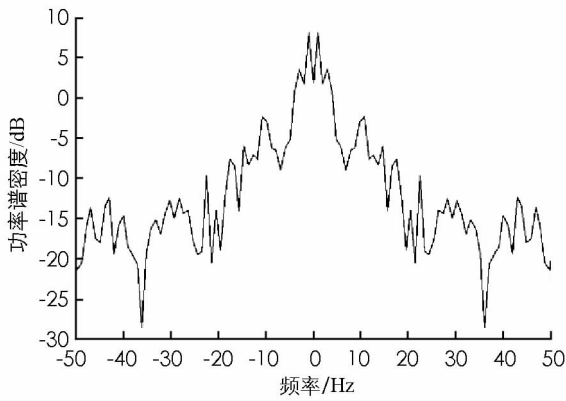


图 3 去掉自流量之后摩擦力矩的频谱特性曲线

算法的步骤概括如下:

- 1) 初始化滑模估计器的参数 ρ, L 以及 δ , 设定障碍物识别门限值;
- 2) 常温下, 电机转速和电流的测量信息, 根据

$$K_i i = J \frac{d\omega}{dt} + T_f(\omega) + T_r + T_p \quad (17)$$

计算出摩擦力矩, 并根据频谱分析结果设计滤波器, 确定摩擦力矩的名义值;

- 3) 基于测量的相关物理量, 综合

$$\hat{x} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) + Pv \quad (18)$$

$$\hat{d} \approx -(C_1 P)^{-1} \rho \text{sign}(C_1 \hat{x} - C_1 X)_{eq} = J\rho \frac{\dot{\omega} - \omega}{|\dot{\omega} - \omega| + \delta} \quad (19)$$

可以估计外部干扰力矩;

- 4) 从估计出的外部扰动力矩中减去摩擦力矩的名义值, 并与障碍物识别门限值进行比较, 大于门限值, 则判定有障碍物, 否则无障碍物. 其中, 前两步离线执行, 并且需要存储第 2 步给出的摩擦力矩的名义值.

3 实验与分析

为了验证防夹算法, 本文使用 dSPACE 构建了一套快速控制原型实验系统, 如图 5 所示. 其中, 车窗升降机构来源于 Audi A6; dSPACE 根据算法的执行结果对电机输出相应的控制指令; 电机驱动电路执行 dSPACE 的控制指令, 驱动电机转动; 通过摩擦力传感器我们可以测出车窗的阻力.

在 25 °C 的常温下, 通过实验确定摩擦力矩的名义值, 并选取估计器的滑模增益 $\rho = 50\,000$, 反馈增益 $L = \begin{bmatrix} 520 & 0.01 \\ 0.1 & 1420 \end{bmatrix}$, 参数 $\delta = 0.015$, 选择道路试验场中的一种波动路面来产生路面干扰力矩, 波动路面是由水平路面和凸起的球冠体构成, 球冠体高 0.16 m, 直径为 1.16 m.

图 6 是没有路面干扰和障碍物时估计出的摩擦力矩和根据车窗电机电流和转速的测量结果, 并依据式(1)计算出来的摩擦力矩的对比曲线, 这表明外部扰动力矩的估计结果与计算结果相符.

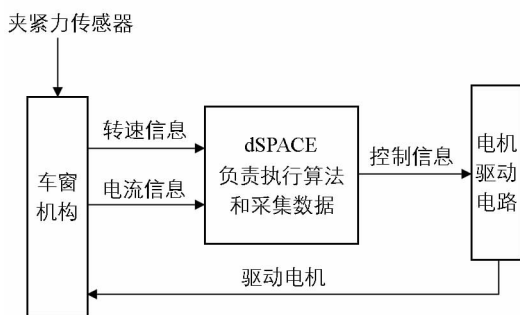


图 5 车窗防夹实验系统

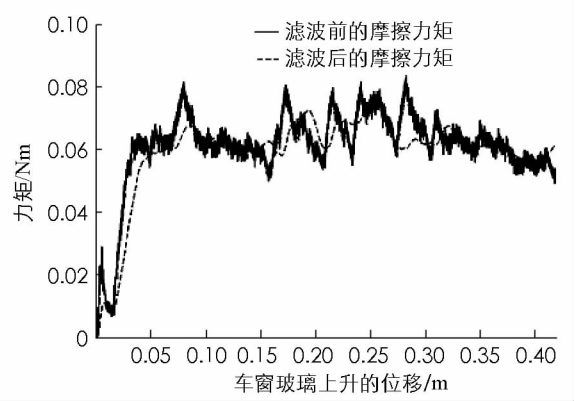


图 4 滤波前后摩擦力矩的对比曲线

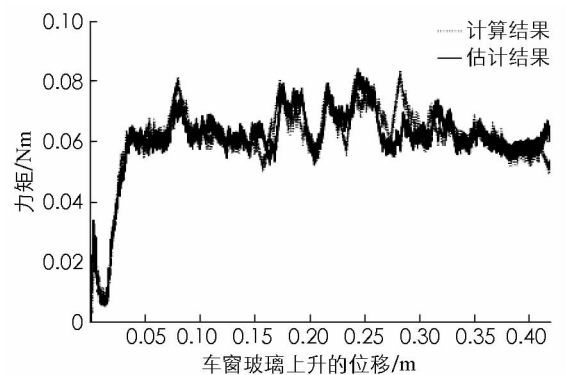


图 6 摩擦力矩估计结果与计算结果的对比曲线

在不同实验条件下,计算通过车窗电机电流和转速的测量结果并根据式(1)计算出外部力矩,与 25 ℃ 下通过实验确定的摩擦力矩名义值的差值. 图 7 是 25 ℃ 下,没有路面干扰和障碍物时的计算结果. 图 8 是 25 ℃ 下,有路面干扰但无障碍物时的计算结果. 图 9 是-20 ℃ 下,没有路面干扰和障碍物时的计算结果. 通过分析这些计算结果,可以确定算法的障碍物识别门限值.

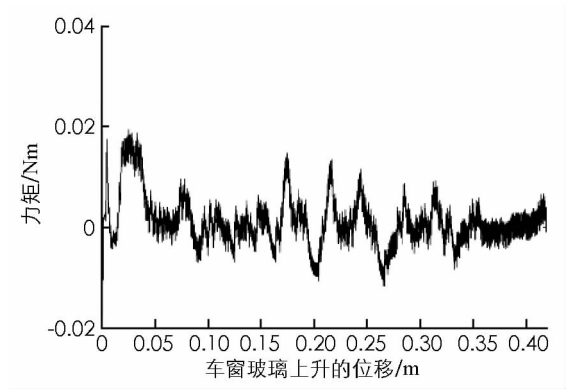


图 7 25 ℃ 下没有路面干扰
和障碍物时的计算结果

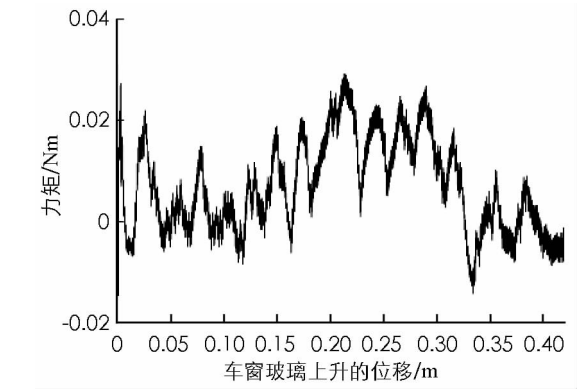


图 8 25 ℃ 下有路面干扰
但无障碍物时的计算结果

应用 25 ℃ 常温下的摩擦力矩名义值,在-20 ℃ 时,对车窗玻璃施加阻力,图 10 是没有路面干扰时的估计结果,图 11 是有路面干扰时的估计结果. 用夹紧力传感器测量出施加的阻力折算为力矩后约为 0.39 Nm. 与图 11 同样的实验条件下,图 12 是电机的力矩常数 K_t 相对于名义值变化 10% 时的估计结果. 图 10,11,12 说明,对于设定的障碍物识别门限值,即使在环境温度、波动路面和参数摄动的干扰下,算法也能够有效地识别障碍物.

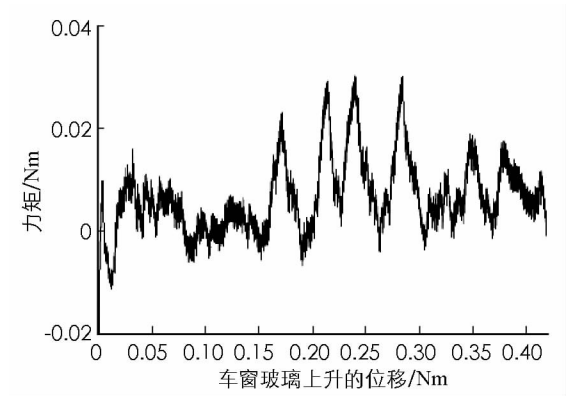


图 9 -20 ℃ 温度下没有路面干扰
和障碍物时的计算结果

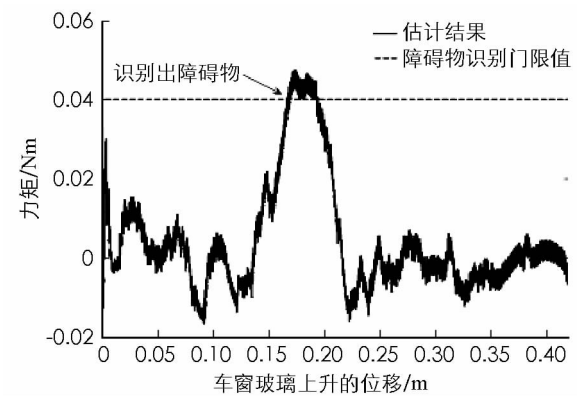


图 10 没有路面干扰时的估计结果

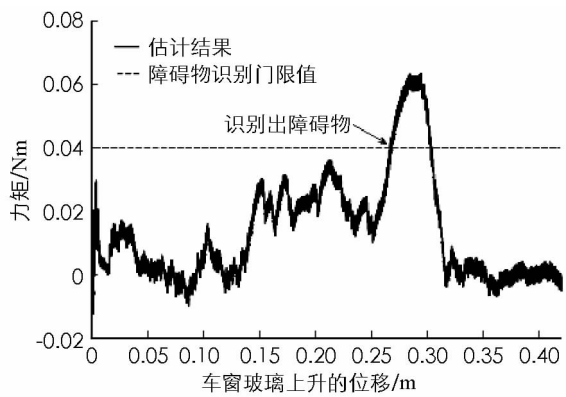


图 11 有路面干扰时的估计结果

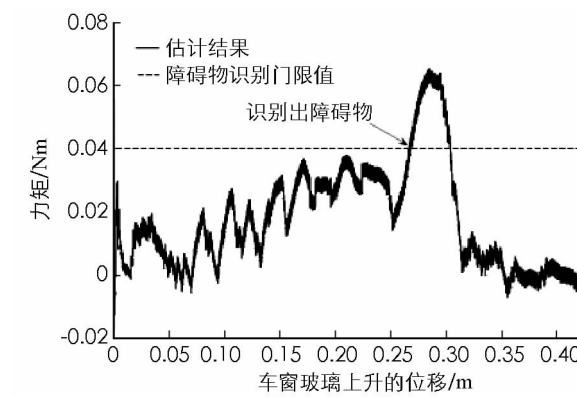


图 12 力矩常数 K_t 相对于名义值
变化 10% 时的估计结果

3 结 论

本文应用滑模估计技术估计电动车窗的外部扰动力矩,基于实验结果,我们从扰动力矩中将摩擦力矩分离出来,提高了对路面干扰力矩和障碍物阻挡力矩的估计精度,进而给出了一种电动车窗玻璃上升过程中的防夹算法。实验结果验证了本文给出算法的有效性。同时,由于计算速度快、易于实现、占用内存少等优点,使得该算法可以在8位的微控制器中实现,具有工程实用价值。但是,将算法进一步简化和优化是下一步要努力探讨的重点。

参考文献:

- [1] 戴国骏,张 翔,张怀相,等. 电动车窗防夹系统的建模与实现 [J]. 汽车工程, 2011, 30(6): 539—542.
- [2] 马加其. 防夹电动车窗的改进算法 [J]. 湖北汽车工程学院学报, 2010, 21(3): 79—80.
- [3] 张 昕,李昌刚,胡俊杰,等. 一种轿车电动车窗防夹控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2010, 33(17): 169—172.
- [4] RA W S, LEE H J, PARK J B, et al. Practical Pinch Detection Alg-Orithm for Smart Automotive Power Window Control Systems [J]. IEEE Trans on Industrial Technology, 2011, 55(3): 1376—1384.
- [5] 钟宇平,王丽丹,段书凯,等. 基于神经网络及强化学习的智能控制系统 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(11): 172—179.
- [6] 陆克盛,杨丽娜,李熙春,等. 微移动切换算法 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(10): 141—146.
- [7] 付朝辉. 电动防夹车窗技术探讨 [J]. 汽车电器, 2012, 20(7): 15—18.
- [8] 杨建国,谢永利,张 晓,等. 高速公路隧道路面抗滑可靠性分析 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(11): 145—149.
- [9] 卞 清,宋 勇,李忠富. 嵌入式汽车车窗控制器设计 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 28(12): 96—99.
- [10] 李延波,杨立英,王汝凉,等. 分布时滞不确定广义系统的滑模控制 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 56—60.
- [11] 廖 强,程金堂,张 衡. 汽车电动车窗防夹控制系统的研究与开发 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2011, 25(3): 1—5.
- [12] 张 勇,李 鑫,欧 健,等. 汽车 ESP 系统的控制策略及硬件在环仿真 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 37(9): 102—108.

On Application of Automotive Power Window Prevention Control Algorithm

LUO Wan-li¹, WU Xiao-yan²

1. Information Technology Department, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

2. Department of Computer Science, Sichuan Arts and Science University, Dazhou Sichuan 635000, China

Abstract: To avoid injury to people and damage to articles caused by pitch of the electric mobile window during its rising, a practical anti-pitch control algorithm is researched. Firstly, the sliding formwork estimator is adopted to make estimation to the unconfirmed external disturbance moment of the electric mobile window, and then the characteristics of the friction moment are confirmed by experiment, and a method to separate the friction moment away from the estimated disturbance moment has been studied, so the estimation of road surface disturbance moment and barrier obstruction moment becomes more accurate, and thus a new window anti-pitch algorithm is given. The experiment results have proved that this method is feasible and effective, and it is rapid in computation, easy to be achieved and takes little memory, so it is adaptive to the engineering application.

Key words: words-pinch detection; sliding mode estimator; torque estimation; friction torque

责任编辑 夏 娟