

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.021

电动独轮车的模糊自适应控制

申晓峰, 章 玮*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对电动独轮车稳态性能差和抗负载转矩扰动能力差的问题,将自适应模糊PD控制技术应用到电动独轮车的姿态控制中。该系统是以加速度计、陀螺仪为姿态传感器,永磁无刷直流电机为执行机构的单轮平衡车,在分析骑行过程中电动独轮车姿态变化的基础上,推导了系统对应的动态模型,建立了电动独轮车的姿态信息与电机输出转矩之间的关系,并结合传统PD控制和模糊控制的相关理论,提出采用自适应模糊PD控制的方法实现电动独轮车的姿态控制。在实验室搭建的电动独轮车上,分别采用传统PD控制和自适应模糊PD控制方法进行了试验比较。研究表明,相比于传统的PD控制器,自适应模糊PD控制在不同的运行环境都可以获得良好的控制效果,可以提高系统的动静态性能。

关键词: 电动独轮车; 自适应模糊PD控制; 动态模型

中图分类号: TH39; TM3; TP273 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1610-05

Self-tuning fuzzy control for the electric unicycle

SHEN Xiao-feng, ZHANG Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving poor stability and poor anti-load-disturbance ability of the electric unicycle, the self-tuning fuzzy PD controller for posture control was investigated. In this system, accelerometer and gyroscope are attitude sensors and permanent magnet brush DC motor is actuator. On basis of analyzing attitude changes during riding, the dynamic model of an electric unicycle was set up, the relationship between attitude information and the motor output torque was built up. Combining conventional PD and fuzzy logic control scheme, the self-tuning fuzzy PD controller was presented to accomplish posture control. The traditional PD control and self-tuning fuzzy PD control were compared on an electric unicycle built in the laboratory. The results indicate that the proposed controller is more flexible and capable than ones with fixed parameters when the unicycle is ridden in different situations.

Key words: electric unicycle; self-tuning fuzzy PD control; dynamic model

0 引 言

相比于电动自行车和摩托车,电动独轮车具有体积小、重量轻,携带方便等很多优点,将成为一种新型的短途出行的交通工具。针对骑行电动独轮车本体结构和控制策略的研究越来越受到人们的关注^[1-6]。

独轮车的控制主要分俯仰和横滚平衡控制,如果独轮车的横滚平衡是由骑行者来实现,那么载人的电

动独轮车的控制目标就是通过对电机的控制实现俯仰平衡。骑行者的身体前倾使车身前倾,为了保证人不摔倒,车轮需要向前滚动来实现俯仰平衡,同理骑行者身体后仰就需要车轮向后滚动来保持平衡。为了实现独轮车的俯仰平衡控制,学者们提出了不同的控制方案。文献[7]提出了传统的PD控制器来实现平衡控制,但是系统的抗干扰能力较差;文献[8-9]提出了一种建模方法并通过线性二次型调节器(LQR)来实现独轮车的稳定,但仅实现车体本身的一种平衡控

收稿日期: 2014-08-15

作者简介: 申晓峰(1990-),男,山西忻州人,主要从事姿态解算和独轮机器人控制方面的研究。E-mail: shenxiaofeng@zju.edu.cn

通信联系人: 章 玮,女,博士,副教授,硕士生导师。E-mail: weizhang@zju.edu.cn

制,没有考虑车体有不同负载时的运行情况。文献[10]提出自适应非线性控制器实现了载人独轮车的平衡控制并获得了良好的骑行性能,但是控制策略以精确的数学模型为基础,实现起来也较为复杂。

为了简化控制模型并在实际骑行中得到较好的动、静态特性,本研究首先利用牛顿力学方法建立骑行电动独轮车的动力学模型,分析不同的骑行者的姿态与被控对象之间的非线性关系,然后设计对被控对象参数变化不敏感的自适应模糊PD控制器,最后通过实验验证控制策略在提高骑行电动独轮车的稳态、动态性能以及鲁棒性方面的有效性。

1 电动独轮车控制模型

1.1 系统框架

骑行电动独轮车外观如图1所示。独轮车的主体为带有控制电路板的外转子永磁无刷直流电机。当骑行者通过前倾或后仰使车体前后倾斜时,永磁无刷直流电机输出合适的转矩使车体滚动,来保持骑行者以及车体的俯仰平衡。踏板跟车体硬性连接,踏板的角度直接反映了车体的倾斜程度,保持踏板水平也就保持了整个系统的平衡。

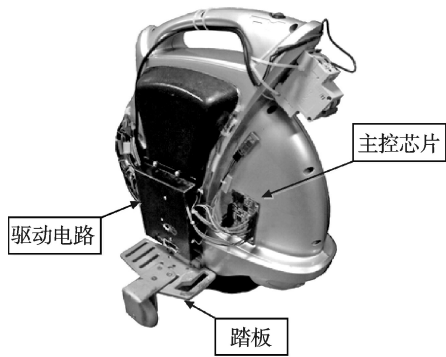


图1 电动独轮车实物图

1.2 数学模型

由于实际的机械零件和运动过程比较复杂,一般需要在允许的范围内忽略摩擦、形变以及弹性等因素。为了建立满足要求的近似数学模型,笔者首先进行如下假设,对独轮车进行合理的简化:

- (1) 独轮车本体以及骑行者均为刚体;
- (2) 运动时车轮不打滑,只有滚动没有滑动;
- (3) 忽略摩阻力偶矩,只考虑摩擦力与摩擦力矩;
- (4) 忽略空气阻力。

独轮车简化模型示意图如图2所示。独轮车在前进的方向是 x 轴正方向,车体轴线为 y 轴,正方向向上。本研究定义的各个变量如表1所示。

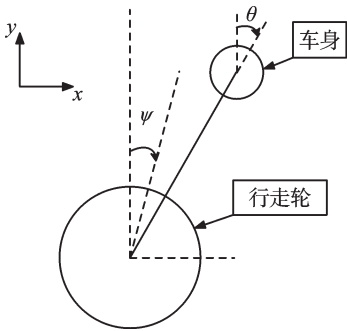


图2 独轮车简化模型示意图

表1 参变量定义

变量(单位)	定义
m/kg	行走轮质量(电机转子以及轮胎)
M/kg	车身质量(电机定子、车身外壳以及骑行者等效质量)
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	行走轮对转轴的转动惯量
$J_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	车身对等效转轴的转动惯量
r/m	行走轮半径
L/m	转轴到车身等效质心的距离
α/rad	地面倾角
ψ/rad	行走轮偏转角
φ/rad	车身俯仰角
T/N	电机的输出转矩
$(x,y)/\text{m}$	车轮位置
$(x_p,y_p)/\text{m}$	车身等效质心位置
$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	车轮行进速度

以在斜坡行走的骑行独轮车为例。车轮的运动可以分解为沿斜坡方向的直线平动和绕独轮车转轴的转动。受力分析如图3(a)所示,车轮受到沿斜坡方向地面的摩擦力 H_f 和指向转轴的支持力 N , 车身对车轮的作用力可以分解为沿 x 轴的 H 和沿 y 轴的 V 。得到方程如下:

$$\begin{cases} m\ddot{v} = -H \cos \alpha - V \sin \alpha - mg \sin \alpha + H_f \\ J\ddot{\psi} = T - rH_f \end{cases} \quad (1)$$

在车轮只有滚动没有滑动的假设下,可以得到:

$$r\ddot{\psi} = \dot{v} \quad (2)$$

由式(1,2)可得:

$$\left(m + \frac{J}{r^2}\right)\dot{v} = -H \cos \alpha - V \sin \alpha - mg \sin \alpha + \frac{1}{r}T \quad (3)$$

车身的运动可以分解为沿斜坡方向的直线运动和绕等效质点的转动。受力分析如图3(b)所示,车身受到车轮对其的作用力可以分解为沿 x 轴的 H 和沿 y 轴的 V 。由此可得到方程:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_p = H \\ M\ddot{y}_p = V - Mg \\ J_p\ddot{\varphi} = VL \sin \varphi - HL \cos \varphi - T \end{cases} \quad (4)$$

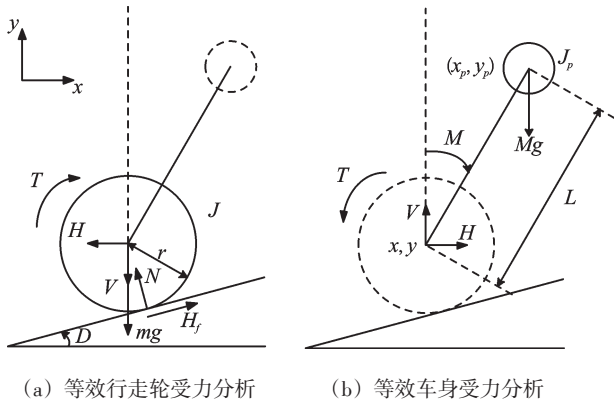


图3 独轮车受力分析示意图

由图3可知:

$$\begin{cases} x_p = x + L \sin \varphi \\ y_p = y + L \cos \varphi \end{cases} \quad (5)$$

对等式两边对 t 微分处理并代入式(4)可以得到车轮与车身之间的相互作用力:

$$\begin{cases} H = M\dot{v} \cos \alpha + ML(\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) \\ V = M\dot{v} \sin \alpha - ML(\ddot{\varphi} \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) + Mg \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3,4)消去相互作用力 H 和 V 可得到:

$$\begin{cases} \left(M + m + \frac{J}{r^2} \right) \dot{v} + ML\ddot{\varphi} \cos(\alpha + \varphi) - ML\dot{\varphi}^2 \sin(\alpha + \varphi) + (M + m)g \sin \alpha = \frac{1}{r} T \\ (J_p + ML^2) \ddot{\varphi} + ML\dot{v} \cos(\alpha + \varphi) - MgL \sin \varphi = -T \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为电动独轮车的动态模型,可以看出车身的俯仰角和转矩呈非线性关系,同时对于同一辆电动独轮车,当不同身高、体重的人骑行时,相应的 M 、 L 和 J_p 也不相同,导致不同的动态模型。如果控制器对模型的依赖性较强,就会增加控制的复杂程度以及对各种运动状态的适应性。

1.3 模糊控制器设计

电动独轮车通过对电机的转矩控制实现最终的平衡运行,其控制框图如图4所示。由陀螺仪和加速度计测量所得的独轮车姿态信息,通过滤波后输入控制器。控制器输出转矩控制信号通过驱动板施加给电机,以此来实现独轮车平衡运行。

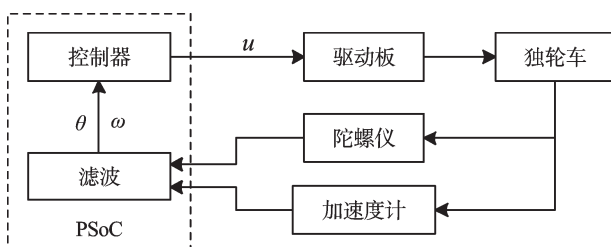


图4 电动独轮车的控制框图

由于实际系统受到外界不确定因素的影响,其模型具有不确定性,传统PD控制器的参数很难保证控制效果始终处于最优状态^[10]。模糊自适应PD控制是以模糊控制规则调节PD参数的一种自适应控制系统,以传统PD控制为基础,根据不同的系统误差及误差变化率,按照模糊规则来在线计算PD参数,从而实现PD参数的最佳调整,能较好地适应模型变化引起参数变化的要求,进而改善系统的动态、静态性能。

为了提高控制器的抗干扰性能,本研究用到的传统PD控制器和模糊自适应PD控制器都引入了角加速度分量。模糊自适应PD控制器结构图如图5所示。

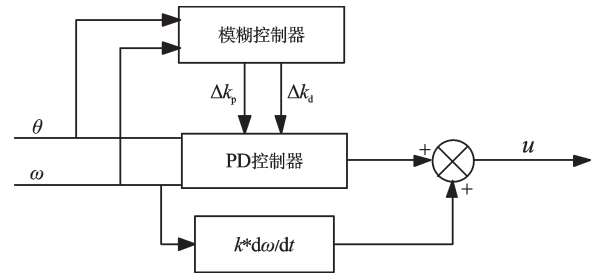


图5 模糊自适应PD控制器结构图

经过滤波之后得到的角度 θ 和角速度 ω 作为模糊控制器的输入,经过模糊推理,然后输出 Δk_p 、 Δk_d , 以此来调整传统PD控制器的参数,对测量得到的角速度 ω 微分得到角加速度 $\dot{\omega}$, PD控制器的输出与角加速度分量相加得到自适应模糊PD控制器的输出 u , 计算公式如下:

$$u = k_p \theta + k_d \omega + k \dot{\omega} \quad (8)$$

其中: k —固定值,设PD参数的初始值为 k'_p 和 k'_d , PD控制器的参数整定的计算公式如下:

$$\begin{aligned} k_p &= k'_p + \Delta k_p \\ k_d &= k'_d + \Delta k_d \end{aligned} \quad (9)$$

设输入 θ 、 ω 和输出 k'_p 、 k'_d 的论域均取为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 对模糊控制器的输入和输出进行模糊化处理。模糊子集为 $\{\text{负大(NB)}, \text{负中(NM)}, \text{负小(NS)}, \text{零(ZO)}, \text{正小(PS)}, \text{正中(PM)}, \text{正大(PB)}\}$, 模糊子集可以通过隶属度函数描述,采用的三角形隶属度函数如图6所示。

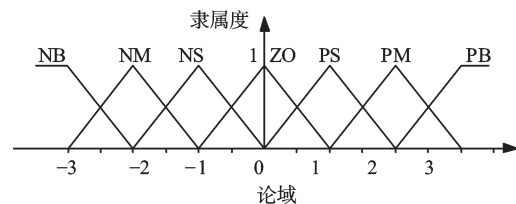


图6 隶属度函数

从式(7)可以看出,电机的输出转矩与车体的加速度、车身的角速度、角加速度相关。转矩与车身的

俯仰角呈非线性关系。对电动独轮车的运行情况进行分析,可归纳得到角度 θ 和角速度 ω 跟PD控制器的参数 k_p 、 k_d 之间的关系:

- (1) 当 $|\theta|$ 较大时,为使独轮车快速得恢复到平衡状态,应该选取较大的 k_p 和较小的 k_d ;
- (2) 当 $|\theta|$ 中等时,为使独轮车恢复到平衡状态时超调较小,应取较小的 k_p 和适当的 k_d ,值得注意的是 k_d 的选取对于系统的响应影响较大;
- (3) 当 $|\theta|$ 较小时,为使独轮车具有较好的稳定性能,应取较大的 k_p , k_d 的选取要恰当,以避免独轮车在平衡点附近出现震荡。

基于以上的定性关系,本研究针对骑行电动独轮车的运行状态,建立的模糊规则表如表1,表2所示。

表1 k_p 的模糊控制规则表

Δk_p	ω						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ	NB	PB	PB	PB	PM	PM	PM
	NM	PB	PB	PM	PM	PM	PS
	NS	PM	PS	PS	ZO	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	PS	PM
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM
	PM	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM	PM	PB	PB

表2 k_d 的模糊控制规则表

Δk_d	ω						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
θ	NB	PM	PM	PS	PS	ZO	ZO
	NM	PM	PS	PS	PS	ZO	NS
	NS	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
	ZO	PM	PM	PS	ZO	PS	PM
	PS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM
	PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM

在模糊控制中,经过模糊逻辑推理后,输出的是模糊量,在此采用重心法来解模糊,算法如下式:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n u_i A(u_i)}{\sum_{i=1}^n A(u_i)} \tag{10}$$

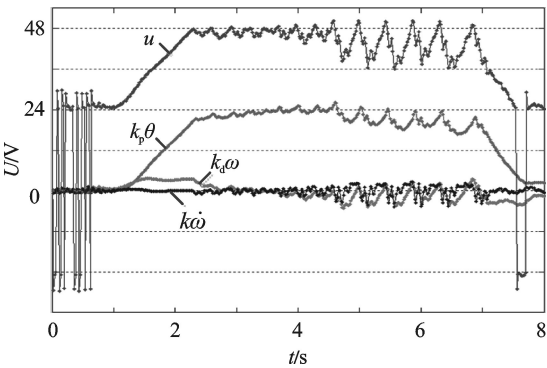
式中: $A(u_i)$ —输出元素的隶属度函数, u_i —输出函数的语言值。

2 实验及结果分析

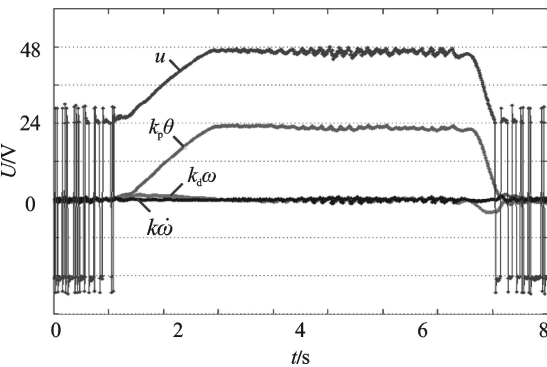
电动独轮车的电机采用外转子永磁无刷直流电机,其额定电压为50 V,额定转速360 r/min,额定功率

350 W。实验时,50 V母线电压由装在独轮车内部区的锂电池提供。主控制芯片采用Cypress公司的PSoC4。

采用传统PD控制和自适应模糊PD控制时,人在骑行过程中的控制量 u 及其组成部分的波形如图7(a)、7(b)所示。图7的纵坐标是根据PWM占空比换算得到的电压值。 $k_p\theta$ 反映了电动独轮车的姿态变化情况, $k_p\theta$ 的数值接近于零表示独轮车处于零点附近的俯仰平衡状态,在骑行过程中,电动独轮车的姿态变化小表明骑行平稳。1 s时,车体在骑行者前倾的过程中开始前进,接近3 s时,车体基本稳定在固定的角度,车体达到转矩平衡,平稳得前行。7 s之后,骑行者离开独轮车,车体慢慢停了下来,再次达到零点附近的俯仰平衡状态。图7(a)、7(b)中 $k_p\theta$ 波形的波动都比较小,说明在两种控制下独轮车都可以正常得骑行,但从图7(b)可以看出自适应模糊PD控制器的应用使得角度波动更小,骑起来更加平稳。



(a) 传统PD控制器

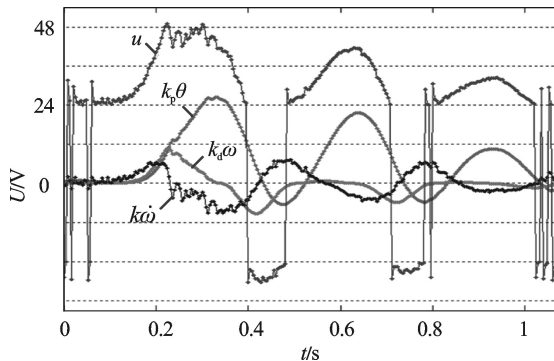


(b) 自适应模糊PD控制器

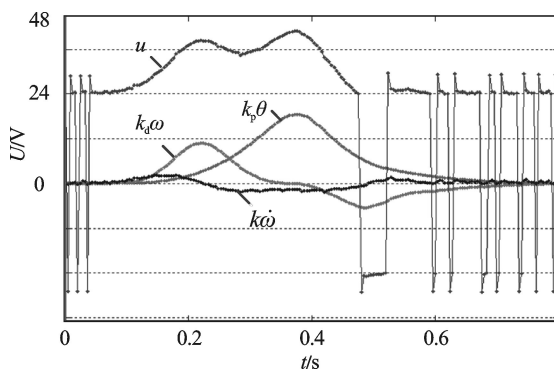
图7 独轮车骑行时的实验波形

两种不同控制方法的动态响应如图8(a)、8(b)所示,在电动独轮车稳定运行时,给车身施加一个力,车身再次达到俯仰平衡过程中控制量 u 及其组成部分的变化情况。在大约0.2 s时,车体受到人为的扰动冲击,采用传统PD控制器的电动独轮车经过3次振荡才恢复平衡,而自适应模糊PD控制的应用使

得车身没有发生振荡,快速平稳得再次达到平衡状态。当施加同样大小的力时,图8(b)中的 $k_p\theta$ 的变化也更小。



(a) 传统PD控制器



(b) 自适应模糊PD控制器

图8 独轮车受到扰动时的实验波形

3 结束语

骑行电动独轮车是一个强非线性系统,不同的骑行环境和骑行者的使用方法对其平衡控制有较大的影响。

本研究设计的自适应模糊PD控制器能较好地适应应用环境,保证骑行者的正常骑行,实验结果验证了控制器稳态性能更好,而且具备更强的鲁棒性。

参考文献(References):

- [1] PATHAK K, AGRAWAL S K. An integrated path-planning and control approach for nonholonomic unicycles using switched local potentials[J]. *IEEE Transactions Robotics and Automation*, 2005, 21(6): 1201-1208.
- [2] XU Y, AU K W. Stabilization and path following of a single wheel robot [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(2): 407-419.
- [3] MAJIMA S, KASAI T. A Controller for Changing the Yaw Direction of an Under Actuated Unicycle Robot [C]//Int Conf on Technology and Automation. Thessaloniki: [s.n.], 2005: 73-88.
- [4] CEDERVALL S, HU Xiao-ming. Nonlinear observers for unicycle robots with range sensors[J]. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2007, 52(7): 1325-1329.
- [5] 郭磊, 廖启征, 魏世民, 等. 独轮机器人的动力学建模与非线性控制[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(9): 2730-2733.
- [6] 董乐, 呼明亮, 邱建琪. 永磁无刷直流电机直接转矩控制策略的比较研究[J]. *轻工机械*, 2013, 31(5): 59-63.
- [7] HOFER K. Observer-based Drive-control for Self-balanced Vehicles[C]//Proceedings of IEEE/IECON 32nd. Annual Conference on Industrial Electronics. Paris: IEEE, 2006: 3951-3956.
- [8] CALDECOTT D, EDWARDS A, HAYNES M, et al. Modeling, Simulation and Control of an Electric Unicycle [C]//Conference on Robotics and Automation. Brisbane: [s.n.], 2010: 1-3.
- [9] HUANG C N. The development of self-balancing controller for one-wheeled vehicles[J]. *Engineering*, 2010(2): 212-219.
- [10] TSAI C C, CHAN C K, SHIH S C, et al. Adaptive Nonlinear Control Using RBFNN for an Electric Unicycle [C]//IEEE international Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Singapore: IEEE, 2008: 2343-2348.
- [11] RONALD R, YAGER, FILEV D P. Essentials of fuzzy modeling and control [J]. *SIGART Bulletin*, 1994, 6(4): 22-23.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

申晓峰, 章 玮. 电动独轮车的模糊自适应控制[J]. *机电工程*, 2014, 31(12): 1610-1614.

SHEN Xiao-feng, ZHANG Wei. Self-tuning fuzzy control for the electric unicycle[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(12): 1610-1614.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>