

DOI: 10.3901/JME.2014.06.129

模糊 PID 控制在万向电动底盘上的应用

陈文科 高艳雯 陈志 王志
(中国农业机械化科学研究院 北京 100083)

摘要: 为满足车辆在狭小封闭空间内运行的要求,克服传统的工业车辆及特种车辆底盘在转向、排放和噪声方面的缺点,设计研发出一种基于 Mecanum 车轮的电动万向底盘。在该电动底盘前期半闭环控制系统的基础上,分析简化运动学模型,设计出基于参数分配器的模糊 PID 全闭环控制系统,并确定系统的硬件结构和软件流程。然后对基于该软硬件控制系统的万向底盘进行试验对比分析,分别选取角速度 $\omega_z=0^\circ/\text{s}$, 速度 $v_x=v_y=0.5\text{ m/s}$ 的匀速直线运动和角速度 $\omega_z=25^\circ/\text{s}$, 速度 $v_x=v_y=0.5\text{ m/s}$ 的匀速圆周运动两种特定工况下,底盘的速度和角速度在控制系统改进前后的实际测试值与期望值的误差对比的试验结果对比分析,通过分析得出相对于只进行电动机编码器半闭环反馈控制系统,改进后的全闭环控制系统具有更好的响应时间和稳态误差精度,更加有利于该万向电动底盘的推广应用。

关键词: Mecanum 车轮; 电动底盘; 模糊比例积分微分
中图分类号: TP273

Application of Fuzzy-PID Controller in Electric Chassis Featured by Mecanum Wheel

CHEN Wenke GAO Yanwen CHEN Zhi WANG Zhi
(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, Beijing 100083)

Abstract: The traditional industrial vehicles and special purpose vehicles have disadvantages in aspect of steering, emission and noise, which on one hand results to inflexible operation and apparently does not conform to the subject of environment protection on the other. In order to overcome these shortcomings that vehicles can run in a small enclosed space as it is demanded and less environmental damage is caused, the improved control system of electric chassis featured by mecanum wheel is designed and developed. On the basis of earlier control system of the electric chassis, the kinematics models are analyzed and simplified, closed-loop control system is designed based on fuzzy proportion intergration differentiation(PID)parameter distributor, and the hardware and software design is completed for control system. Two drive cycles are done to compare the new control system with the earlier control system, one drive cycle is a uniform linear motion which the speed $v_x=v_y=0.35\text{ m/s}$ and angle speed $\omega_z=0^\circ/\text{s}$; another drive cycle is a uniform linear motion which the speed $v_x=v_y=0.5\text{ m/s}$ and angle speed $\omega_z=25^\circ/\text{s}$; The experimental analysis suggested the improved closed-loop control system responded faster and had more accurate steady-state error in comparison of the motor encoder semi-closed loop feedback control system, which is more conducive to the promotion and application of this electric chassis.

Key words: Mecanum wheel; electric chassis; fuzzy proportion intergration differentiation

0 前言

基于 Mecanum 轮的万向电动底盘采用电动机直接驱动,通过机械传动机构实现底盘的行走和任意方向的转向,具有转向灵活、无污染、噪声小的特点,可应用于狭小封闭的环境以及一些对尾气排

放、噪声有要求的场所。良好的控制算法可以实现底盘比较灵活和精准的控制,有利于该底盘的推广应用。

常规比例积分微分(Proportion intergration differentiation, PID)控制算法简单、鲁棒性好、可靠性高,特别是 PID 控制不依赖于被控对象的精确模型,只要了解对象的响应特性,就可以得到满意的控制效果。近年来,为提高 PID 算法的控制效果,

很多学者利用非线性特性提出了模糊 PID 控制算法。该算法继承了常规 PID 的诸多优点,并且具有更大的灵活性、自适应性和精确性,已经广泛应用于各类设备上^[1],但是鲜有模糊 PID 控制理论应用 Mecanum 轮型万向电动底盘整体控制的相关报道。

1 运动学模型分析

Mecanum 轮是一种可以使车辆实现万向运动的车轮。这种轮子的圆周上不是普通的轮胎,而是分布了许多经特殊参数化设计的鼓形辊子^[2],见图 1。辊子的轴线与轮的轴线成角度,并且辊子可绕自身轴线自由旋转。这些辊子的外轮廓包络面与轮子的理论圆柱面相重合。这样的特殊结构使得轮体具备了 3 自由度:绕主轮轴的转动、沿辊子轴线垂线方向的平动和绕辊子与地面接触点的转动^[3-4]。这样,驱动轮在一个方向上具有主动移动能力的同时,另外一个方向也具有自由移动(被动移动)的运动特性。当电动机驱动车轮旋转时,车轮以普通方式沿着垂直于驱动轴的方向前进,同时车轮周边的辊子沿着其各自的轴线自由旋转^[5]。这种车轮利用轮组的不同速度组合实现全向运动,如图 2 所示,不需要独立的转向驱动机构,系统支撑稳定可靠,控制简单。

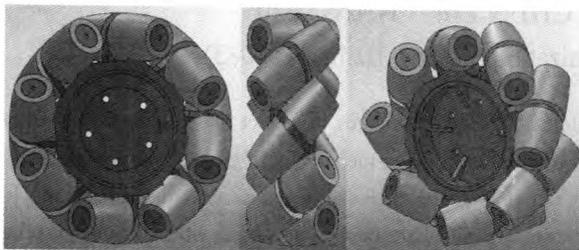


图 1 Mecanum 轮外形图

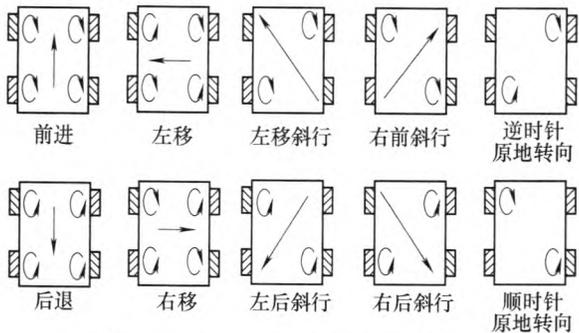


图 2 Mecanum 轮底盘运动原理示意图

如图 3 所示为本文中研究的万向电动底盘。在该底盘的车架上装有四个独立控制的 Mecanum 车轮。电动机控制器根据总控制器(Motor control unit, MCU)输入指令控制电动机实现车轮任意角度的转向,可以方便地对该底盘进行任意位置移动操作,

另外,由于采用电动机驱动,克服了现有底盘在排放和噪声方面的不足,可应用在如仓库、货场等对排放和噪声有要求的室内和室外场所,使该底盘具有较宽的应用范围。



图 3 万向电动底盘外形图

四个 Mecanum 轮组成的底盘的运动参数如图 4 所示,四个车轮的转动速度和车体速度之间的关系为

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/R & -1/(R \tan \alpha) & -(W \tan \alpha + L)/(2R \tan \alpha) \\ 1/R & 1/(R \tan \alpha) & -(W \tan \alpha + L)/(2R \tan \alpha) \\ 1/R & -1/(R \tan \alpha) & (W \tan \alpha + L)/(2R \tan \alpha) \\ 1/R & 1/(R \tan \alpha) & (W \tan \alpha + L)/(2R \tan \alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

- 式中 α ——轮子与辊子之间的夹角;
- $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ ——4 个轮的转动速度;
- R ——车轮半径;
- W, L ——图示底盘的结构尺寸;
- v_x, v_y, ω_z ——该电动底盘在平面 x, y 方向上行驶速度和绕 z 轴的转动速度^[6]。

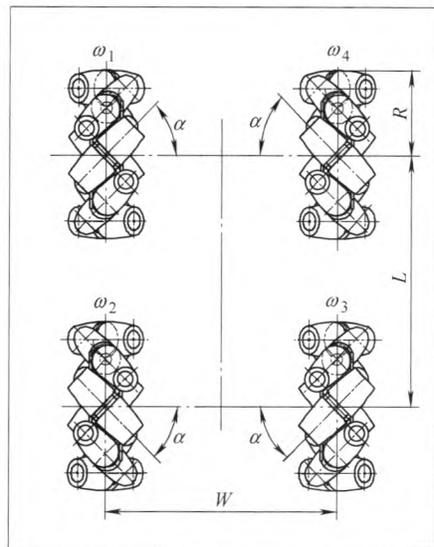


图 4 Mecanum 轮转速车体速度的关系示意图

当 $\alpha=45^\circ$ 时, 式(1)可简化为

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = \frac{1}{R} \begin{pmatrix} 1 & -1 & -(W+L)/2 \\ 1 & 1 & -(W+L)/2 \\ 1 & -1 & (W+L)/2 \\ 1 & 1 & (W+L)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

这样简化以后, 车轮的速度就和车轮半径 R , 底盘外形尺寸 W 、 L 以及操纵杆给出的模拟信号 v_x 、 v_y 、 ω_z 有关。

2 电控系统设计

2.1 系统组成

本电动底盘选用交流感应电动机, 不仅调速范围宽, 而且能够实现低速恒转矩, 高速恒功率运转^[7]。电动机控制器为 CURTIS1236 型控制器, CURTIS1236 型控制器的交流电动机的控制模式选用速度模式。在速度控制模式下, 电动机的输出转速与电位计的位置对应。MCU 采用 Cortex-M3 LPC1766。电动机控制器与 MCU 之间采用 CAN 通信, 选用 CAN 模块 CTM8251T, 由编码器检测车轮的行驶速度。

2.2 运动控制器实现

该万向底盘前期控制方案是采用半闭环 PI 控制系统, 操纵信号输入到 MCU 进行处理分析, 通过 CAN 通信对电动机控制器进行控制, 电动机转速信号通过编码器反馈到电动机控制器, 对电动机输出进行校正。电动机在速度控制模式下, 电动机控制器需要控制的参数主要有电动机的最高速度、比例控制系数、积分控制系数、速度反馈参数及加速度反馈参数。电动机响应的控制参数有全加速响应参数、减速响应参数、制动响应参数和精调参数。在这种控制方式下, 经过调试发现, 由于四轮分别独立进行控制校正输出, 虽然可以实现对单个车轮的较好控制, 但是由于误差的随机性和积累效应, 会矫正不足或者过矫正, 使得底盘出现跑偏的现象。为了达到更好的控制效果, 提出改进的控制系统从全局控制考虑, 对整个底盘采用基于参数分配器的模糊 PID 控制, 其结构如图 5 所示。

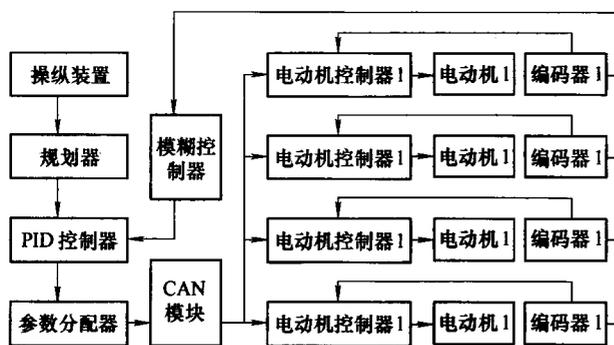


图5 控制系统结构简图

在该运动控制器中, 操纵装置的控制信号输入到 MCU, 规划器处理分析得到相应的输入控制变量 v_x 、 v_y 、 ω_z , PID 控制器输出控制电压, 使车轮的速度与期望速度一致, 使用参数分配器目的是自动合理地分配四个电动机的控制电压。电动机控制器对电动机的控制为双闭环控制, 即通过速度反馈控制环和电流反馈控制环, 对各自电动机进行 PI 调节控制, 可以实现任何情况下电动机的快速响应和精确控制; 编码器检测到的数值反馈到模糊控制器, 进行模糊推理得到自动在线校正的 PID 调节参数 K_P 、 K_I 及 K_D , 再送到 MCU 中进行计算分析, 矫正输出值, 构成闭环控制。这样形成的闭环控制系统既实现了四个电动机的协调工作, 又提高了单体电动机的有效控制, 对外部干扰具有极强的鲁棒性。即使在非线性负载, 负载突变或瞬间短路等恶劣情况下也能保证系统的稳定运行, 因而具有较高的可靠性。

其中参数自整定模糊 PID 控制器在常规 PID 控制器的基础上, 采用模糊推理思想, 根据不同的 $|E|$ 和 $|\dot{E}|$, 对 PID 参数 K_P 、 K_I 及 K_D , 进行在线参数自整定^[8]。结构框图如图 6 所示。

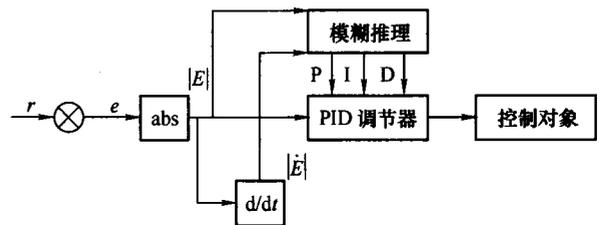


图6 参数自整定模糊PID控制器结构框图

根据算法的控制性能优劣和实现容易度原则, 二维模糊推理器的两个输入变量选用期望输入的偏差 E 和其偏差变化率 \dot{E} , 能反映被控对象输出变量的动态特性, 且其结构又比三维模糊控制简单。因此, PID 参数自整定的模糊推理器采用二输入三输出的结构。其中的参数校正部分实质为一个模糊推理机, 其输入语言变量为偏差绝对值 $|E|$ 和偏差变化率绝对值 $|\dot{E}|$, 输出语言变量为 K_P 、 K_I 及 K_D 的基本论域范围可根据试验数据分析确定。模糊决策采用 Mamdani 法^[9], 最后采用重心法进行反模糊化得到精确值, 其再乘上比例因子就可以得到精确的 PID 参数。

2.3 控制系统软件部分

Cortex M3-1766 单片机采用的是美国 Keil Software 公司出品的 Keil uVision3 软件平台, 它是一款可用于多种系列单片机的集成开发环境 (Integrated development environment, IDE)^[10], 该

IDE 具有源代码、功能导航器、模板编辑、搜索以及配置向导功能,加速了启动代码和配置文件的生成;其内置的仿真器可模拟目标芯片,包括指令集、片上外围设备及外部信号等。Keil uVision3 还提供逻辑分析器,可监控基于 I/O 引脚和外设状态变化下的程序变量。Keil uVision3 使用接近于传统 C 语言的语法来开发,在功能、结构性、可读性、可维护性上有明显的优势,可大大提高了工作效率和项目开发周期。

该控制系统利用软件实现了多个控制行为模块:如直线运动模块、斜行运动模块、原地回转模块等,可按需求调用相应的功能模块,从而执行不同的控制策略。控制系统主程序流程示意图见图 7。

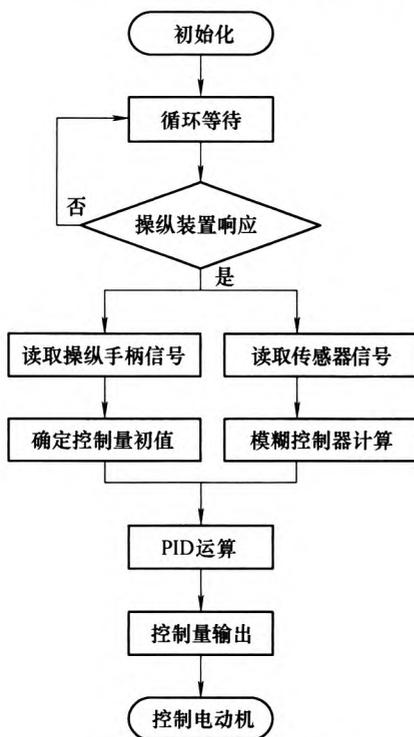


图 7 主程序流程示意图

3 试验方法与结果分析

在自行研制的万向底盘上分别运用半闭环电动机控制系统和基于参数自整定模糊 PID 闭环控制系统进行了万向底盘直线运动、圆周运动、横移运动、原地转向运动等多组运动控制对比试验,每种工况设置特定的期望值,然后对比分析两种控制方式的控制曲线,即控制的实际效果,以验证基于参数自整定模糊 PID 运动控制器比原有控制系统在运动控制性能上更优越。

为了试验方便准确,采用计算机设置期望速度,通过 USB 数据采集卡采集传感器数据以及监视 CAN 总线上的数据流。选择路面宽度为 12 m,长度为 70 m 的干燥平直沥青路面作为测试场地。下

面仅列出匀速直线运动和匀速圆周运动两种典型工况下分别采用两种控制方式进行对比试验的结果,每次试验中人为地添加一次强干扰,致使万向底盘的速度,角速度这两个运动参数都发生了较大的突变,以观察系统的抗干扰特性。

3.1 匀速直线运动

当期望角速度 ω_z 设定为 0,速度设定为 $v_x=0.35$ m/s, $v_y=0.35$ m/s 时即合成速度 $v \approx 0.5$ m/s,匀速直线运动的控制变量响应曲线分别如图 8 所示。试验结果表明,闭环模糊 PID 控制角速度的稳态误差在 $\pm 3.2^\circ/\text{s}$ 范围内,其平均误差为 $0.29^\circ/\text{s}$,而半闭环控制角速度的稳态误差在 $\pm 5^\circ/\text{s}$ 范围内,其平均误差为 $0.56^\circ/\text{s}$;闭环模糊 PID 控制速度的上升时间为 2.8 s,其稳态误差在 ± 0.06 m/s 范围内,其平均误差为 0.021 m/s,而半闭环控制速度的上升时间为 4.7 s,稳态误差在 ± 0.09 m/s 范围内,其平均误差为 0.038 m/s。

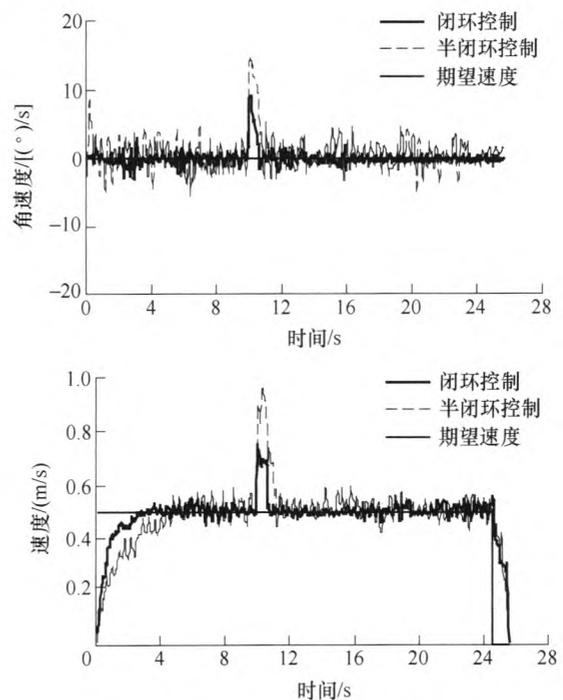


图 8 直线运动速度与角速度控制曲线

3.2 匀速圆周运动

当角速度设定如下: $\omega_z=25^\circ/\text{s}$,速度设定为 $v_x=v_y=0.5$ m/s 时,即 $v \approx 0.707$ m/s 匀速圆周运动的控制变量响应曲线分别如图 9 所示。试验结果表明,闭环模糊 PID 控制角速度的稳态误差在 $\pm 3^\circ/\text{s}$ 范围内,其平均误差为 $0.42^\circ/\text{s}$,而半闭环控制角速度的稳态误差在 $\pm 6^\circ/\text{s}$ 范围内,其平均误差为 $0.73^\circ/\text{s}$;闭环模糊 PID 控制速度的上升时间为 3.3 s,其稳态误差在 ± 0.09 m/s 范围内,其平均误差为 0.018 m/s,而半闭环控制速度的上升时间为 5 s,稳态误差在 ± 0.1 m/s 范围内,其平均误差为 0.027 m/s。

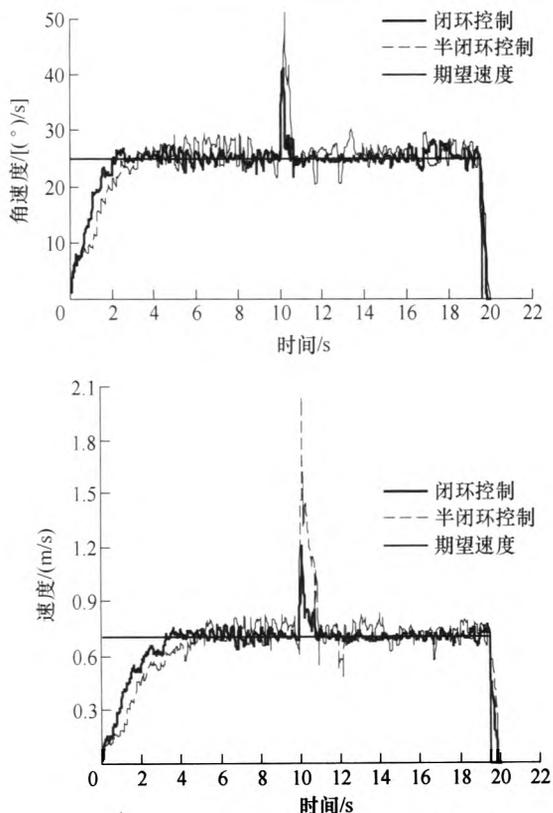


图9 圆周运动速度与角速度控制曲线

通过多种运动控制试验结果分析表明, 与原来的半闭环控制系统相比, 参数自整定模糊 PID 算法闭环控制系统由于在不同误差时采用了不同的调节参数, 四轮协调控制, 实时修改控制参数, 万向底盘整体的速度和角速度的控制指标都得到较大幅度改善, 体现为响应时间减短, 速度和角速度的稳态误差精度得到了明显提高。同时在有外界干扰的情况下, 能迅速调整到正常状态, 说明系统有良好的跟随性和稳定性, 抗干扰能力也有明显的提高。

4 结论

Mecanum 车轮是一种独特的能在平面上能实现 3 自由度全方位轮式移动机构, 它反应迅速, 操纵灵活, 而且技术比较成熟^[11], 该轮系构成了本文研究的万向电动底盘的行走载体。通过对该轮系进行运动学模型分析简化, 设计了基于参数分配器的模糊 PID 闭环控制系统, 经过试验分析, 相对于只进行以电动机控制器为主的半闭环控制系统, 改进后的闭环控制系统具有更好的响应时间和稳态误差精度, 对于研究 Mecanum 轮型电动底盘控制方法具有较强的参考和借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 倪敬. 管捆成形电液系统自学习粗糙-模糊 PID 控制研

究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 224-228.

NI Jing. Rough fuzzy PID control and ITS application to auto-shaping machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 224-228.

[2] DOROFTEI I, GROSU V, SPINU V. Omnidirectional mobile robot-Design and implementation[J]. Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, 2007, 9: 511-528.

[3] 周京京, 郭爱东, 李春卉. 基于 CosmosMotion 的 Mecanum 轮运动仿真[J]. 起重运输机械, 2011(11): 39-41.

ZHOU Jingjing, GUO Aidong, LI Chunhui. Cosmos motion-based mecanum wheel motion simulation[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2011(11): 39-41.

[4] 侯彬, 李亚明. 麦克纳姆轮技术及其在船用轮式设备中的应用[J]. 船舶工程, 2011, 33(3): 84-87.

HOU Bin, LI Yaming. Mecanum wheel technology and its application in ship wheel devices[J]. Ship Engineering, 2011, 33(3): 84-87.

[5] SALIH J E M, RIZON M, YAACOB S, et al. Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel[J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(5): 1831-1835.

[6] GFRERRER A. Geometry and kinematics of the mecanum wheel[J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25: 784-791.

[7] 王成元. 现代电动机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

WANG Chengyuan. Modern motor control technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[8] 孙长江, 随顺科, 卜丽. 基于模糊 PID 的双闭环控制器设计[J]. 制造业自动化, 2011, 33(14): 151-153.

SUN Changjiang, SUI Shunke, BU Li. Design of double closed loop controller based on fuzzy PID[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(14): 151-153.

[9] 张化光, 何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

ZHANG Huaguang, HE Xiqin. Fuzzy adaptive control theory & application[M]. Beijing: Beihang University Press, 2003.

[10] 鲜浩. 单片机原理及工程设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

XIAN Hao. Principle and engineering design methods for single chip microcomputer[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.

[11] 王一治, 常德功. Mecanum 车轮全方位系统的运动性能分析及结构形式优选[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 307-310.

WANG Yizhi, CHANG Degong. Motion performance analysis and layout selection for motion system with four

mecanum wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 307-310.

作者简介: 陈文科, 男, 1981年出生, 博士研究生。主要研究方向为特种电动车辆。

E-mail: venco81@163.com

第3届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

仿生粘着的机理及应用研究

作者: 周铭

毕业学校: 清华大学

指导教师: 温诗铸

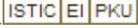
仿生技术极大改变了人类的社会和经济生活, 启发了很多影响人类社会发展的仿生发明。作为自然界中对粘着和摩擦具有出色控制能力的代表, 壁虎具有在墙壁和天花板行走自如的卓越的攀爬能力。基于这种粘着、爬行能力的仿生功能表面、爬壁机器人在反恐、搜救、侦查、太空定位、抓持、清洁等国家安全、工业技术、日常生活等领域具有深远的应用前景。研究其粘/脱附机理和仿生表面设计理论, 对开发新一代干粘着功能表面及器件具有重要理论指导意义和实用价值。本文从剥离区域影响剥离性能及各向异性性能关系的角度对仿壁虎刚毛功能表面的设计理论及制备应用进行了研究, 主要取得如下成果。

发展了剥离区域的基本理论模型。建立了考虑速度效应的拓展剥离区域模型。使用此模型, 可将剥离问题中的三个重要参数——剥离强度、剥离速度、剥离角度之间的关系在同一公式中进行描述。

发展了强粘附、易剥离性能和集束行为的设计理论。建立了基于柱状纤维的仿壁虎刚毛表面剥离区域对剥离行为影响的数值计算模型, 讨论了仿生表面的强粘附和易脱附特性的设计准则, 发展了粘着、剥离设计图。通过优化结构参数, 剥离力相比粘附力可以减小至少3个数量级。还对微纳米纤维阵列表面的集束行为进行了研究, 使用两个量纲一参数对临界集束行为判据进行描述, 建立了集束稳定性评价准则。

讨论了倾斜碳纳米管阵列剥离区域变形对其各向异性性能的影响。制备了倾斜多壁碳纳米管阵列表面, 试验表明其具有40%的稳定的摩擦各向异性性能。观测并描述了卸载过程中与壁虎刚毛类似的各向异性粘附摩擦现象, 并考虑碳纳米管末梢的接触变形, 建立了基于范德华相互作用力的摩擦各向异性理论模型。

设计出一种基于仿壁虎刚毛表面的夹持器原型机。对具有末端薄板结构的蘑菇状纤维阵列仿壁虎刚毛表面进行了性能表征和设计评价, 为仿生表面在夹持器上的应用提供了理论和试验依据。进而设计了一种用于硅片等轻质、易碎物体转移搬运的小型夹持器, 实现了粘着力力的有效控制, 对推进仿壁虎刚毛表面在智能仿生粘附器件上的应用具有重要意义。

作者: [陈文科](#), [高艳雯](#), [陈志](#), [王志](#), [CHEN Wenke](#), [GAO Yanwen](#), [CHEN Zhi](#), [WANG Zhi](#)
作者单位: [中国农业机械化科学研究院](#) 北京 100083
刊名: [机械工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2014, 50(6)

参考文献(11条)

1. [倪敬](#) [管捆成形电液系统自学习粗糙-模糊PID控制研究](#)[期刊论文]-[机械工程学报](#) 2006(10)
2. [DOROFTEI I](#); [GROSU V](#); [SPINU V](#) [Omnidirectional mobile robot-Design and implementation](#) 2007
3. [周京京](#); [郭爱东](#); [李春卉](#) [基于CosmosMotion的Mecanum轮运动仿真](#)[期刊论文]-[起重运输机械](#) 2011(11)
4. [侯彬](#); [李亚明](#) [麦克纳姆轮技术及其在船用轮式设备中的应用](#) 2011(03)
5. [SALIH J E M](#); [RIZON M](#); [YAACOB S](#) [Designing omni-directional mobile robot with mecanum wheel](#) 2006(05)
6. [GFRERRER A](#) [Geometry and kinematics of the mecanum wheel](#) 2008
7. [王成元](#) [现代电动机控制技术](#) 2009
8. [孙长江](#); [随顺科](#); [卜丽](#) [基于模糊PID的双闭环控制器设计](#)[期刊论文]-[制造业自动化](#) 2011(14)
9. [张化光](#); [何希勤](#) [模糊自适应控制理论及其应用](#) 2003
10. [鲜浩](#) [单片机原理及工程设计方法](#) 2012
11. [王一治](#); [常德功](#) [Mecanum车轮全方位系统的运动性能分析及结构形式优选](#) 2009(05)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxgxb201406019.aspx