

万向电动底盘控制系统设计*

陈文科 陈 志 王 志 高艳雯 田 甜 高玉秀

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

摘要: 在分析由4个 Mecanum 轮组成的车辆运动学模型和动力学模型的基础上,设计了基于参数分配器的模糊 PID 双闭环控制系统,对采用该系统进行控制的基于 Mecanum 轮的电动万向底盘进行实验分析,验证了该控制系统具有更好的响应时间和稳态误差精度,能够满足该电动底盘在狭小空间内精确运动的要求。

关键词: Mecanum 轮 电动底盘 模糊 PID 控制系统 设计

中图分类号: U463.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0019-05

Control System Design of Omnidirectional Electric Chassis

Chen Wenke Chen Zhi Wang Zhi Gao Yanwen Tian Tian Gao Yuxiu

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of kinematic model and dynamic model of vehicle with four Mecanum wheel, the fuzzy PID dual closed-loop control system was designed based on parameter distributor. The Mecanum wheels based electric chassis with the proposed system was analyzed and tested. The control system was proved to have a good response time and steady-state error precision, which satisfied the requirement of precise movement of electric chassis in tight space.

Key words: Mecanum wheel Electric chassis Fuzzy PID Control system Design

引言

目前,自行走的高空作业平台、叉车、航空发动机搬运车等车辆上所用的底盘大多采用发动机或电动机驱动液压马达实现底盘的行走,采用液压油缸推动车轮围绕铰接点转动实现车轮的转向。在狭小封闭的环境中,一般要求车辆具有转向灵活、无污染、噪声小的特点,而采用液压油缸的转向方式由于受到机械结构和转向控制精度的限制,无法实现任意方向的精确转向;另外,发动机的使用经常受到限制,而采用电动机作为动力源的车辆则可以实现零排放和低噪声。本文设计一种基于 Mecanum 车轮的万向电动底盘。

1 底盘结构及模型分析

全方位运动系统以 Mecanum 轮全方位系统研究应用最多^[1],Mecanum 轮由轮辐和固定在外周的

多个辇子构成,轮子和辇子之间的夹角通常为 45° ,每个车轮具有3个自由度:绕轮子轴心转动、绕辇子轴心转动和绕轮子与地面的接触点转动^[2]。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,同时车轮周边的辇子沿着其各自的轴线自由旋转^[3]。

这种全方位系统轮与悬架固定,利用轮组的不同速度组合实现全向运动,不需要独立的转向驱动机构,系统支撑稳定可靠,控制简单^[4]。将4个独立驱动控制的 Mecanum 车轮固定在车架上构成该万向电动底盘的主体结构。电动机控制器根据总控制器(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。本文研究的电动万向底盘如图1所示。



图1 万向电动底盘外形图

Fig.1 Omnidirectional electric chassis

1.1 运动学建模

该电动底盘系统4个 Mecanum 轮构成(图2), 4个轮子的转动速度和车体速度之间的关系为

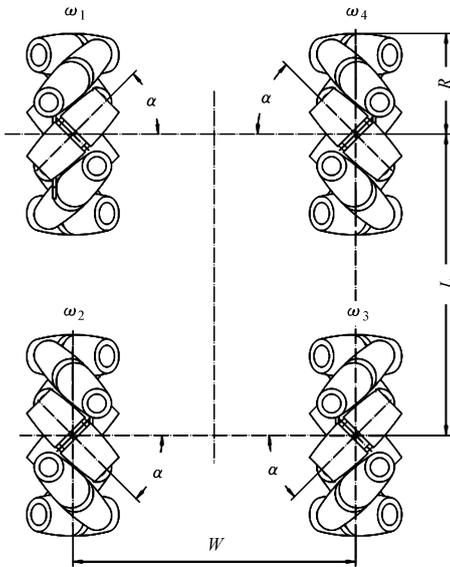


图2 Mecanum 轮转速与车体速度的关系示意图

Fig.2 Relationship between rotate speed of Mecanum wheels and vehicle speed

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1/R & -1/(R\tan\alpha) & -(W\tan\alpha + L)/(2R\tan\alpha) \\ 1/R & 1/(R\tan\alpha) & -(W\tan\alpha + L)/(2R\tan\alpha) \\ 1/R & -1/(R\tan\alpha) & (W\tan\alpha + L)/(2R\tan\alpha) \\ 1/R & 1/(R\tan\alpha) & (W\tan\alpha + L)/(2R\tan\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 α ——轮子与辇子之间的夹角

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ ——4个轮的转动角速度

R ——车轮半径

W, L ——底盘结构尺寸

v_x, v_y ——该电动底盘在平面 x, y 方向上行驶速度^[5-6]

ω_z ——绕 z 轴的转动角速度

当 α 为 45° 时, 式(1)可简化为

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

简化以后, 车轮速度和车轮半径 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。针对同一底盘控制4个车轮不同的转速可以实现不同的 v_x, v_y, ω_z , 进而实现底盘实现全方位运动。

1.2 动力学建模

建立全方位移动底盘动力学模型的方法有多种, 常用的主要有拉格朗日(Lagrange)方法、牛顿-欧拉(Newton-Euler)方法、高斯(Gauss)方法以及阿佩尔(Appel)方程式等^[7-8], 其中拉格朗日法利用各部分的速度即可求解, 求解方式相对简单有效, 本文采用拉格朗日法建模。

拉格朗日方程可表示如下

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (3)$$

式中 q_j ——系统广义坐标

L_a ——拉格朗日函数, 等于系统动能减去势能

Φ ——系统耗散函数

Q_j ——系统广义力

由于在平面上运动, 全方位移动底盘的势能为零, 忽略辇子的自由旋转动能, 因此其拉格朗日函数和耗散函数分别为

$$L_a = E_k = \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2 + \frac{1}{2} I_w \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} D_w \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \quad (5)$$

式中 m ——底盘质量 E_k ——底盘动能

D_w ——轮子黏性摩擦系数

I_z, I_w ——底盘和轮子转动惯量

对于全方位移动底盘, 定义广义力为轮子的驱动转矩 T_i , 广义坐标为轮子的角位移, 将式(2)、(4)、(5)代入式(3)中, 得到拉格朗日动力学方程为^[9-10]

$$\mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{D}_w \boldsymbol{\omega} = \mathbf{T} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} G+H+I_w & -H & G-H & H \\ -H & G+H+I_w & H & G-H \\ G-H & H & G+H+I_w & -H \\ H & G-H & -H & G+H+I_w \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]^T \in \mathbf{R}^4$$

$$\mathbf{T} = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4]^T \in \mathbf{R}^4$$

$$\mathbf{D}_w = \text{diag}(D_{w1}, D_{w2}, D_{w3}, D_{w4})$$

$$G = \frac{mR^2}{8} \quad H = \frac{I_z R^2}{16(L+W)^2}$$

式中 $\dot{\omega}$ ——轮子角加速度

M ——运动惯量阵, 其中的元素由底盘的参数决定

因此, 全方位移动底盘的动力学状态空间模型可表示为

$$\dot{\omega} = -M^{-1}D_{\omega}\omega + M^{-1}T \quad (7)$$

2 控制系统设计

2.1 硬件系统组成

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^[11]。选用 CURTIS1236 型控制器, 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 通讯, 选用 CAN 模块 CTM8251T, 由编码器检测车轮的行驶速度。

系统硬件组成如图 3 所示。

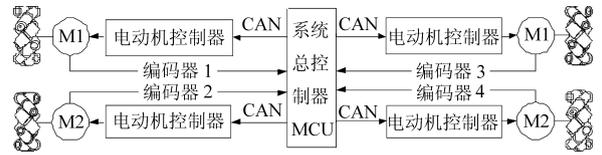


图 3 控制系统硬件系统

Fig.3 Hardware of control system

2.2 模糊 PID 控制器设计

电动万向底盘采用基于参数分配器的模糊 PID 控制对整个底盘实现双闭环控制, 其结构如图 4 所示。

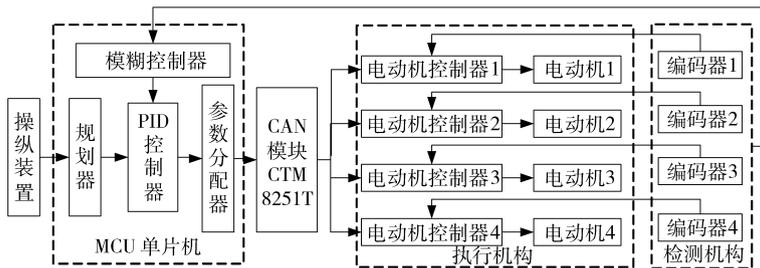


图 4 控制系统结构简图

Fig.4 Structure of control system

在运动控制器中, 操纵装置的控制信号输入 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 4 个电动机的控制电压, 每个电动机控制器分别对各自电动机进行 PID 调节控制, 编码器检测到的参数反馈到 PID 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 和 K_d , 进行整个系统的 PID 控制, 形成双闭环 PID 控制系统。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 K_p 、 K_i 及 K_d 进行在线参数自整定。结构框图如图 5 所示。

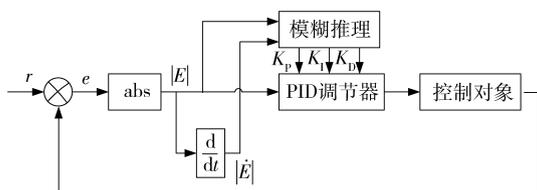


图 5 参数自整定模糊 PID 控制器结构框图

Fig.5 Structure of fuzzy PID parameter controller

根据算法的控制性能和实现容易度原则, 二维模糊推理器的 2 个输入变量选用期望输入的偏差 E

和其偏差变化率 \dot{E} , 既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^[12]。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 K_p 、 K_i 和 K_d 的基本论域范围可根据实验数据分析确定^[13]。各语言变量隶属函数定义均取线性函数。模糊决策采用 Mamdani 法: 与 (and) 方法为 Min, 或 (or) 方法为 Max, 模糊推理方法为 Min, 合成方法为 Max^[14]。最后采用重心法进行反模糊化, 为了加强隶属度大的元素的作用, 则可以取加权系数为 $\mu(\mu_i)^2$, 这时有

$$U = \frac{\sum_i \mu(\mu_i)^2 \mu_i}{\sum_i \mu(\mu_i)^2} \quad (8)$$

式中 U ——反模糊化的精确值

μ_i ——模糊变量元素

$\mu(\mu_i)$ —— μ_i 的隶属度

可见, 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 控制系统软件设计

控制系统采用的单片机 Cortex - M3 LPC1766

基于美国 Keil Software 公司出品的 Keil uVision3 集成开发环境 (IDE)^[15], 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 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, 可提高工作效率并缩短开发周期。

控制系统主程序流程示意图如图 6 所示。控制系统利用软件实现多个控制行为模块: 直线运动模块、斜行运动模块、原地回转变模块等, 可按需求选择相应的功能模块, 从而执行不同的控制策略。

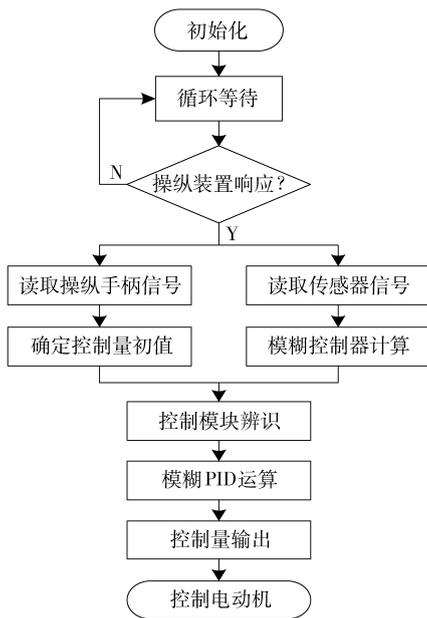


图 6 主程序流程示意图

Fig. 6 Flow chart for main programme

3 实验方法与结果分析

在自行研制的万向底盘上运用基于参数自整定模糊 PID 双闭环控制系统进行了直线运动、圆周运动、横移运动、原地转向运动等多组运动控制实验, 以验证基于参数自整定模糊 PID 运动控制系统的控制精度和可靠性。

为了实验方便准确, 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。选择长度为 70 m 宽度为 16 m 的干燥平直沥青路面作为测试场地, 底盘的基本参数如表 1 所示。

3.1 匀速直线运动速度响应实验

设定期望角速度 $\omega_z = 0$, 设定速度 $v_x = 0, v_y = 0.8$ m/s, 即合成速度 $v = 0.8$ m/s, 匀速直线运动的

表 1 底盘主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of chassis

| 参数 | 数值 |
|---------------------------------------|--------|
| 底盘质量 m/kg | 2 000 |
| 轴距 L/mm | 2 060 |
| 轮距 W/mm | 1 680 |
| 车轮半径 R/mm | 225 |
| 底盘转动惯量 $I_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$ | 2 020 |
| 轮子转动惯量 $I_w/\text{kg}\cdot\text{m}^2$ | 1. 619 |

速度、角速度响应曲线如图 7 所示。实验结果表明, 速度的上升时间为 2.6 s, 其稳态误差在 ± 0.05 m/s 范围内, 其平均误差为 0.008 m/s; 角速度的稳态误差在 $\pm 3(^{\circ})/\text{s}$ 范围内, 其平均误差为 0.27($^{\circ})/\text{s}$ 。

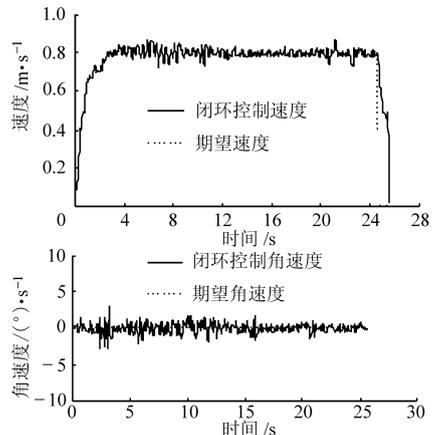


图 7 直线运动速度与角速度控制曲线

Fig. 7 Curves of linear motion speeds and angular speed

3.2 正弦运动速度响应实验

设定角速度 $\omega_z = 25 \sin(2k\pi T/500)$ ($^{\circ})/\text{s}$, 速度 $v_x = v_y = 0.5$ m/s, 即 $v \approx 0.707$ m/s, 匀速正弦运动的控制变量响应曲线如图 8 所示。实验结果表明, 速度的上升时间为 3.4 s, 其稳态误差在 ± 0.05 m/s 范围内, 其平均误差为 0.009 m/s。角速度的稳态误差在 $\pm 3.5(^{\circ})/\text{s}$ 范围内, 其平均误差为 0.30($^{\circ})/\text{s}$ 。

3.3 直线运动轨迹实验

设定期望角速度 $\omega_z = 0$, 速度 $v_y = 0$ m/s, $v_x = 0.5$ m/s 和 $v_x = 0.5$ m/s, 即合成速度为 $v = 0.5$ m/s 和 $v = 1$ m/s 条件下, 匀速直线运动轨迹曲线如图 9 所示。

实验结果表明, 直线行驶时, 能够很好地实现路径跟踪, 侧向滑移较小。

3.4 稳态回转性能实验

在实验场地上, 画出半径为 3 m 的圆周。设定 $\omega_z = 60v_x/\pi$ ($^{\circ})/\text{s}$, $v_y = 0$, 初始 $v_x = 0.1$ m/s, 使底盘沿所画圆周稳定行驶, 待底盘能对准地面所画圆周时, 然后缓缓连续而均匀地加速, 逐渐将速度增大到 2 m/s。侧向加速度与转弯半径比的曲线和稳态回

转轨迹曲线如图 10 和图 11 所示。

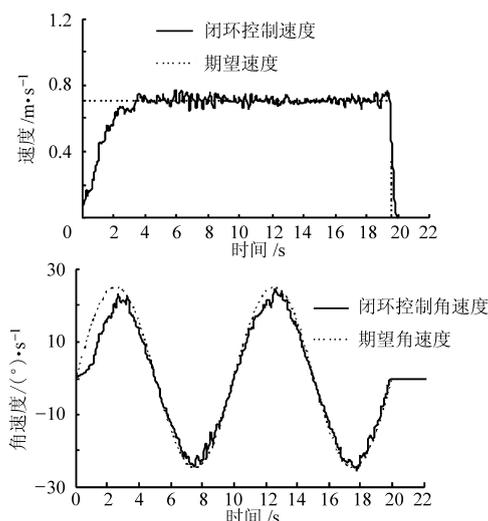


图 8 正弦运动速度与角速度控制曲线

Fig. 8 Curves of sine motion speed and angular speed

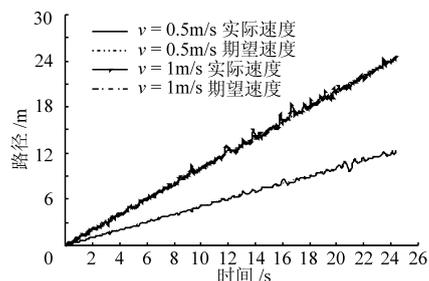


图 9 直线运动轨迹曲线

Fig. 9 Trajectory curves of linear motion

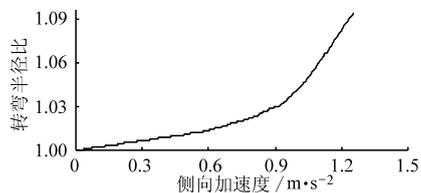


图 10 侧向加速度与转弯半径比曲线

Fig. 10 Curves of lateral acceleration and turning radius

结果表明, 车轮的侧向滑移随着速度的增大而逐渐增大, 满足不足转向的操作性能。

3.5 蛇形回转性能实验

设定蛇形路线如图 12 所示, 第 1 个周期内的轨迹曲线为 $y = 2\sin(\pi x/6)$ 和第 2 个周期内的轨迹曲

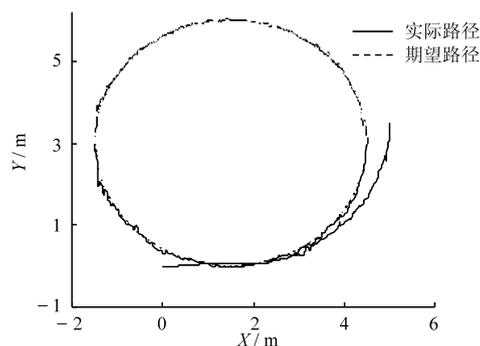


图 11 稳态回转运动轨迹

Fig. 11 Trajectory curves of steady circular

线为 $y = 2\sin(\pi x/10)$ 。

操纵底盘以 1 m/s 的速度沿蛇形轨迹稳定运行, 结果表明 2 个运行周期的路径跟踪性能都很好。

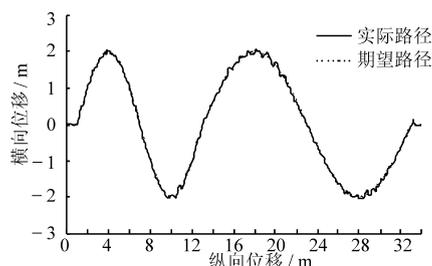


图 12 蛇形稳态回转运动轨迹

Fig. 12 Trajectory curves of snakelike motion

通过多种运动控制实验结果分析表明, 参数自整定模糊 PID 双闭环控制系统根据实际情况采用不同的调节参数, 能实现四轮协调控制, 实时修改控制参数, 电动万向底盘整体的控制指标达到了较理想的状态, 响应时间较短, 稳态误差精度也满足设计要求。

4 结束语

研究的电动万向底盘采用 Mecanum 轮可以在平面上实现 3 自由度全方位轮式移动, 它反应迅速, 操纵灵活, 而且技术比较成熟。对该轮系建立了运动学模型和动力学模型, 设计了基于参数分配器的模糊 PID 双闭环控制系统, 经过不同的多组实验分析表明该控制系统具有较好的响应时间和稳态误差精度。

参 考 文 献

- 1 Florentina Adăscăltei, Ioan Doroftei. Practical applications for mobile robots based on Mecanum wheels—a systematic survey [C] // Proceedings of International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-tech Products Development-MECAHITECH'11, 2011, 3:112 ~ 123.
- 2 Jefri Efendi, Mohd Salih, Mohamed Rizon. Design ingomni-directional mobile robot with Mecanum wheel [J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(5):1 831 ~ 1 835.
- 3 Kyung-Lyong Han, Oh Kyu Choi, In Lee, et al. Design and control of omni-directional mobile robot for mobile haptic interface[C] // International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008, Seoul, Korea, 2008:1 290 ~ 1 295.
- 4 关利赢, 郝鑫, 常力欣. 万向电动叉车螺旋滚轮轮体设计[J]. 军事交通学院学报, 2009, 11(2): 65 ~ 68. Guan Liying, Hao Xin, Chang Lixin. Design of Mecanum wheels of omni-directional electric forklifts[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2009, 11(2): 65 ~ 68. (in Chinese)

- 6 朱思洪,朱永刚,朱星星,等.大型拖拉机动力换挡变速箱试验台[J].农业机械学报,2011,42(4):13~17.
Zhu Sihong, Zhu Yonggang, Zhu Xingxing, et al. Test-bed of power shift transmission for large-scale tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):13~17. (in Chinese)
- 7 迟媛,蒋恩臣.履带车辆差速式转向机构性能试验[J].农业机械学报,2008,39(7):14~17.
Chi Yuan, Jiang Enchen. Performance tests on differential steering mechanism of tracked vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):14~17. (in Chinese)
- 8 倪向东,朱思洪,欧阳大业,等.拖拉机液压机械无级变速器速比匹配设计与实验[J].农业机械学报,2013,44(4):15~20
Ni Xiangdong, Zhu Sihong, Ouyang Daye, et al. Hydro-mechanical CVT speed ratio of different job status with tractor to match design and experimental [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):15~20. (in Chinese)
- 9 曹青梅,周志立,张明柱.车辆液压机械式自动变速器的换挡品质控制[J].河南科技大学学报:自然科学版,2005,26(1):18~21.
Cao Qingmei, Zhou Zhili, Zhang Mingzhu. Shifting qualities control on HMT of vehicle[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2005, 26(1):18~21. (in Chinese)
- 10 Henning J Meyer. Fahrzeuggetriebe betehnick getriebe in traktoren[R]. Tag der Wissenschaftlichen Aussprache, Berlin, 2009.
- 11 Karl Th Renius, Rainer Resch. Continuously variable tractor transmissions[C]//ASAE Distinguished Lecture Series No. 29, 2005: 1~37.
- 12 张明柱,周志立,徐立友.农业拖拉机用多段液压机械无级变速器设计[J].农业工程学报,2003,19(6):118~121.
Zhang Mingzhu, Zhou Zhili, Xu Liyou. Design of a multirange hydrostatic mechanical transmission for farm tractors [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6):118~121. (in Chinese)
- 13 袁志发,台海燕.实验设计与分析[M].北京:中国农业出版社,2008:151~168.
- 14 陈宁,赵丁选,于微波.改善动力换挡变速箱换挡品质的研究[J].机床与液压,2004(10):29~31.
Chen Ning, Zhao Dingxuan, Yu Weibo. Study on improving shift quality of power shift transmissions [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004(10):29~31. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 23 页)

- 5 王一治,钱晋武,常德功.不平地面上 Mecanum 轮全方位系统运动学通用模型[J].机械工程学报,2009,45(9):77~81.  
Wang Yizhi, Qian Jinwu, Chang Degong. General kinematics model of motion system with Mecanum wheels on uneven floor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9):77~81. (in Chinese)
- 6 Gfrerrer A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel [J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(9):784~791.
- 7 De Villiers M, Tlale N S. Development of a control model for a four wheel Mecanum vehicle [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2012, 134(1): 011007.
- 8 杨福广,阮久宏,李贻斌.4WID-4WIS 车辆横摆运动 AFS+ARS+DYC 模糊控制[J].农业机械学报,2011,42(10):6~12.  
Yang Fuguang, Ruan Jiuhong, Li Yibin. 4WID-4WIS vehicle yaw control based on fuzzy logic control of AFS+ARS+DYC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):6~12. (in Chinese)
- 9 王双双,张豫南,王和源.全方位移动平台模糊滑模轨迹跟踪控制[J].微特电机,2012,40(8):63~66.  
Wang Shuangshuang, Zhang Yu'nán, Wang Heyuan. Trajectory tracking based on fuzzy sliding mode control for omnidirectional platform[J]. Small & Special Electrical Machines, 2012, 40(8):63~66. (in Chinese)
- 10 Tlale N, Villiers M. Kinematics and dynamics modelling of a Mecanum wheeled mobile platform[C]//IEEE 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008, 3:657~662.
- 11 王成元.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009
- 12 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.
- 13 乔俊福,温泽源.模糊控制算法在移动机器人中的应用[J].兵工自动化,2012,31(3):79~82.  
Qiao Junfu, Wen Zeyuan. Application of fuzzy control algorithm in mobile robot[J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(3):79~82. (in Chinese)
- 14 郭伟斌,陈勇.基于模糊控制的除草机器人自主导航[J].机器人,2010,32(2):204~209.  
Guo Weibin, Chen Yong. Fuzzy control based autonomous navigation for a weeding robot[J]. Robot, 2010, 32(2):204~209. (in Chinese)
- 15 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.