

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.004

# 一种 Mecanum 轮全向移动平台的设计\*

章玮滨, 唐 炜\*

(江苏科技大学 机械工程学院 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 针对传统移动平台无法满足在狭小空间内作业的问题,在对 Mecanum 轮结构及其工作原理进行分析的基础上,建立了其一般形式的运动学模型,并基于 STM32 和模糊 PID 自整定算法设计了一种嵌入式控制系统。由 VB.NET 编写了上位机软件,通过蓝牙无线控制平台的运动,并采用模糊 PID 自整定控制算法实现了闭环控制;经过多组典型实验,结合测距传感器,对该移动平台进行了运动性能测试。测试结果表明:该全向移动平台的运动学模型是合理的,控制系统运行可靠,样机能较好地实现平面内的全方位运动。模糊 PID 自整定控制算法控制精度高、实时性好,可满足工程应用要求。

**关键词:** Mecanum 轮; 全向移动平台; 运动学分析; 模糊 PID 自整定算法

中图分类号: TH122; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)07-0679-06

## Design of omni-directional movement platform with Mecanum wheel

ZHANG Wei-bin, TANG Wei

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Aiming at the traditional mobile platform can not meet the problem of working in a narrow space, based on the analysis of structure and work principle of the Mecanum wheel, the kinematics model of the omni-directional movement platform was established, and its embedded control system was designed based on STM32 and fuzzy self-tuning PID algorithm. Software in host computer was programmed by VB.NET, which controls the platform movement via Bluetooth wireless communication and fuzzy self-tuning PID control algorithm to build a closed-loop control. The whole motion performance of the mobile platform was tested by several typical experiments with the use of rangefinder sensor. The results indicate that the kinematics model of the omnidirectional movement platform is reasonable, the control system runs stably, the prototype can implement arbitrary directional movement in the plane, the fuzzy self-tuning PID control algorithm has high control precision and a good real-time performance that can meet the requirements in the practical engineering applications.

**Key words:** Mecanum wheel; omni-directional movement platform; kinematics analysis; fuzzy PID self-tuning algorithm

## 0 引 言

轮式全向移动机构在平面内具有 3 个自由度,可做前后直线运动、横向侧移运动、斜 45° 直线运动、原地回转运动及任意组合运动<sup>[1]</sup>。全向移动主要依靠全方位轮组来实现, Mecanum 轮因其具有结构紧凑、运动灵活稳定等优点,已发展为全方位轮组机构的主要

研究热点<sup>[2-3]</sup>。Mecanum 轮全向移动机构具有传统移动机构无法相比的优点,工作空间小、效率高,已在仓库储运等作业场合狭小的领域得到了应用。

建立运动学模型是分析全向运动能否实现的理论基础。目前,对全向移动平台进行运动学建模主要有矢量分析法和矩阵变换法。文献[4-6]中采用的是后者,虽然建模比较简单,但该方法使用标量分析,导

收稿日期: 2017-09-15

基金项目: 江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15\_0524)

作者简介: 章玮滨(1994-),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要从事机电控制及其自动化等方面的研究。E-mail: zhangwb7@163.com

通信联系人: 唐炜,男,工学硕士,副教授,硕士生导师。E-mail: tangweisc@163.com

致通用性较差,且在地面不平整时完全失效;文献[7]中研究了 Mecanum 轮的原理并做了运动仿真;文献[8]中研究了 Mecanum 轮采用 Solidworks API 的参数化实体建模的可行性。但上述研究都只做了运动分析和算法仿真,缺少样机的实验验证,且对 Mecanum 轮技术的工程化应用涉及甚少。

在研究平台全向移动原理的基础上,本文将采用矢量分析法建立逆运动学模型,并为其设计一套嵌入式控制系统,最后借助测距传感器对其进行运动性能测试。

## 1 Mecanum 轮全向移动平台机构的设计

### 1.1 机械本体的设计

Mecanum 轮主要由轮毂、辊子、支撑体 3 部分组成,其辊子与轮子之间成一个偏置角,由此来分解前进时车轮旋转的力,通过四轮的配合,即可实现全向移动。文献[9]中研究了辊子轮廓的曲线参数方程,其解析式较为复杂,为计算方便,本文采用椭圆曲线加以近似。为减少辊子的磨损和噪声,为每个辊子包上一层硬质橡胶材料作为缓冲,并降低 Mecanum 轮的安装要求。

本文研究的全向移动平台由 4 个 Mecanum 轮组成,采用四轮驱动,即由 4 个直流电机通过减速器分别独立驱动各个 Mecanum 轮。平台运动时,安装于其中的微控制器(microcontroller unit, MCU)协同控制各直流电机的转速和转向,使平台实现一系列全方位运动。为简化分析,将车体视为刚体,忽略因受力产生的轻微变形,并假设车轮与地面无相对滑动,仅存在纯滚动。其装配模型如图 1 所示。

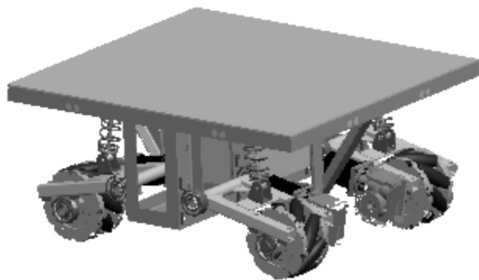


图 1 全向移动平台三维模型

传动装置安装于 Mecanum 轮径向侧边。对于行星轮减速器,通常将动力输出轴和电机轴采用平行安装的方式,多数需要使用联轴器使动力传递到车轮。本设计需要实现 Mecanum 轮的单独控制,因此,在结

构上需要较大的轴向空间。该设计采用涡轮蜗杆减速器,其输入轴和输出轴呈直角,能大大提升机械结构的紧凑性。

笔者设计的减震机构类似于车辆的纵臂式悬架结构, Mecanum 轮用带座轴承和摆臂与车体连接,在摆臂上方安装弹簧减震器与车架连接。该减震机构可使 Mecanum 轮在垂直平面内摆动,减小车身物理参数的变化,从而提高控制精度。

### 1.2 全向移动原理

全向移动平台运动时车轮的受力分析如图 2 所示。

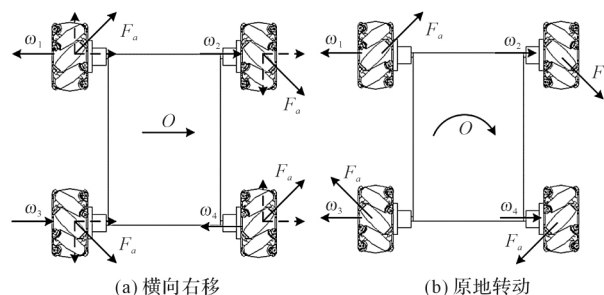


图 2 全向移动平台受力分析

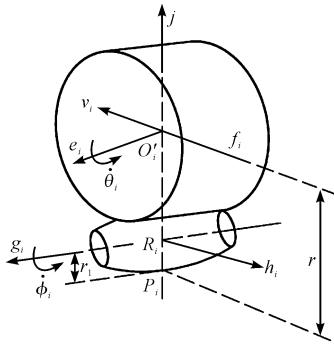
由图 2 可知:4 个车轮的角速度大小相等,方向可由右手定则解出。平台移动时,辊子和地面之间的接触摩擦力与车轮运动方向相反,由该摩擦力分解而来的沿辊子轴线的摩擦力  $F_a$  是平台驱动力的主要来源,另一支分解力为垂直于辊子轴线的法向力  $F_r$ ,由于该滚动摩擦力相对要小很多,通常可忽略。在图 2(a)中,将 4 个 Mecanum 轮着地辊子所受的轴向力  $F_a$  均分解为横向和纵向的两个分力,则四轮的纵向合力为零,横向合力方向向右,使平台向右横移;图 2(b)中四轮的受力合成后将使平台实现原地旋转。

## 2 Mecanum 轮全向移动平台控制系统设计

### 2.1 运动学分析

本研究采用矢量分析法对平台进行逆运动学建模,先讨论单轮的辊子中心到轮子中心的速度关系,以等式列出,再以平台为整体,分析其质心  $O$  到车轮中心的速度关系式;联立两式,经过化简可解出 4 个 Mecanum 轮与质心  $O$  之间的映射关系,即建成平台的运动学模型。

第  $i$  个 Mecanum 轮的结构如图 3 所示。

图3 第*i*个Mecanum轮结构原理图

$r$   $r_1$ —轮子和辇子的半径;  $e_i$   $g_i$ —两个单位向量, 方向分别为轮毂与辇子的轴线方向;  $P_4$ —辇子与地面的接触点, 过  $P_4$  做一条直线分别与辇子和轮毂的轴线相交于  $R_4$  和  $O_1$ , 即为辇子和轮毂的中心;  $f_i$   $h_i$   $j$ —垂直于  $O_1R_4$  方向和沿  $O_1R_4$  方向的单位向量;  $\dot{\theta}_i$   $\dot{\varphi}_i$ —轮毂与辇子的转速。

先定义一个相对速度量  $v_i$ , 将轮毂与辇子的中心点线速度  $\dot{O}_1$  与  $\dot{R}_4$  相互关联, 有:

$$\dot{O}_1 = \dot{R}_4 + v_i \quad (1)$$

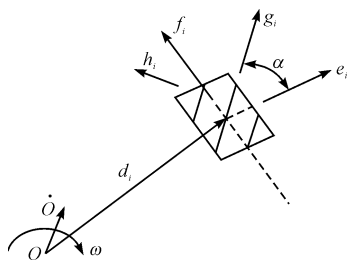
$$v_i = (\omega j + \dot{\theta}_i e_i) \times (r - r_1) j = -\dot{\theta}_i (r - r_1) f_i \quad (2)$$

$$\dot{R}_4 = (\omega j + \dot{\theta}_i e_i + \dot{\varphi}_i g_i) \times r_1 j = -\dot{r}_1 (\dot{\theta}_i f_i + \dot{\varphi}_i h_i) \quad (3)$$

将式(1~3)联立, 可得:

$$\dot{O}_1 = -r\dot{\theta}_i f_i - r_1\dot{\varphi}_i h_i \quad (4)$$

再推导轮毂中心点  $\dot{O}_1$  相对于平台中心点  $O$  的速度关系式。Mecanum 轮与平台中心点  $O$  的关系如图4所示。

图4 第*i*个Mecanum轮与中心点*O*的关系

由图4可得:

$$\dot{O}_1 = \dot{O} + \omega E d_i \quad (5)$$

式中:  $\dot{O}$   $\omega$ —点  $O$  的线速度和角速度;  $d_i$ —位置矢量, 由点  $O$  指向轮  $i$  中心点  $\dot{O}_1$ ;  $E$ —旋转矩阵, 可使  $d_i$  逆时针旋转  $90^\circ$ 。

由于所有辇子都无驱动, 故可消去  $\dot{\varphi}$ 。将  $h_i^T$  同时左乘于式(4~5)两端, 可得:

$$\dot{\theta}_i = -\frac{1}{r \sin \alpha} (h_i^T \quad h_i^T \cdot E d_i) \begin{pmatrix} \dot{O} \\ \omega \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$ —辇子轴线与轮毂轴线的偏置角。

将4个车轮的关系式结合起来, 建立起平台逆运动学模型的一般形式, 即:

$$\dot{\theta} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} = -\frac{1}{r \sin \alpha} K \begin{pmatrix} \dot{O} \\ \omega \end{pmatrix} = -\frac{1}{r \sin \alpha} \begin{pmatrix} h_1^T & h_1^T \cdot E d_1 \\ h_2^T & h_2^T \cdot E d_2 \\ h_3^T & h_3^T \cdot E d_3 \\ h_4^T & h_4^T \cdot E d_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{O} \\ \omega \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\theta}$ —四轮转速(含方向);  $K$ —该模型的雅克比矩阵。

不难看出, 全向平台若能按照不同路径运动, 其中心广义速度(即线速度和旋转角速度)会随时产生变化。当轮组布局和辇子偏置角确定下来后, 通过式(7)即可求出四轮的实时转速, MCU 即可对4个直流电机进行协同控制, 使平台实现预期的全方位运动。

## 2.2 系统硬件结构设计

全向移动平台控制系统的总体结构如图5所示。

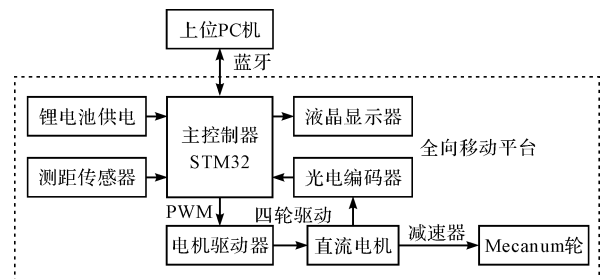


图5 控制系统基本组成

由于地面并不是完全平坦的, 所以在系统实际运行时, 辇子与地面的接触情况会受其影响, 而降低平台的控制精度。常规PID算法的  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  这3个参数都是确定不变的, 对于非线性系统往往其鲁棒性和适应性达不到较高的要求<sup>[10]</sup>。本文采用模糊PID自整定控制算法, 可在线实时对上述3个参数进行自适应调整, 增强抗干扰性, 提升系统的控制精度和鲁棒性。实现模糊控制有3个重要步骤: 参数模糊化、模糊推理、清晰化计算<sup>[11-12]</sup>。

### 2.2.1 模糊化

参数模糊化即根据对应的论域范围, 将输入的确定量转化为模糊量。本文控制器的输入量是误差  $e = r - y$  及误差变化率  $ec = de/dt$ 。其论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 所对应的模糊域为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

正大。在此选用三角形隶属度函数以简化算法、提高控制的实时性。在论域范围内,不论自变量取何值,其隶属度均非负。

### 2.2.2 模糊推理

在进行这一步前,首先分别定义  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  的模糊论域以及  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  各自的模糊推理规则。根据专家经验,在输入不同的  $e$  和  $ec$  的情况下,要求 3 个参数须对应各自模糊规则表。

### 2.2.3 清晰化

为了将所得的模糊量清晰化,本文采用重心法<sup>[13]</sup>,引入一个模糊变量  $\mu_c(z_i)$  对模糊值  $Z_i$  进行加权计算得出清晰值:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \mu_c(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_c(z_i)} \quad (8)$$

式中:  $Z_0$ —清晰值。

再通过线性变换,由  $Z_0$  得到实际的 PID 控制量,则  $\Delta K_p$  的实际调整值应为:

$$\Delta K_p = \frac{U_2 + U_1}{2} + k \left( Z_0 - \frac{Z_2 + Z_1}{2} \right) \quad k = \frac{U_2 - U_1}{Z_2 - Z_1} \quad (9)$$

式中:  $k$ —比例系数。

### 2.3 软件控制设计

上位 PC 机控制程序由 VB.NET 编写而成,主要功能是将需要设定的全向移动平台的一系列运动参数通过蓝牙发送到样机的 MCU 里,并在上位机上实时显示样机的运动轨迹和状态。该程序界面如图 6 所示。

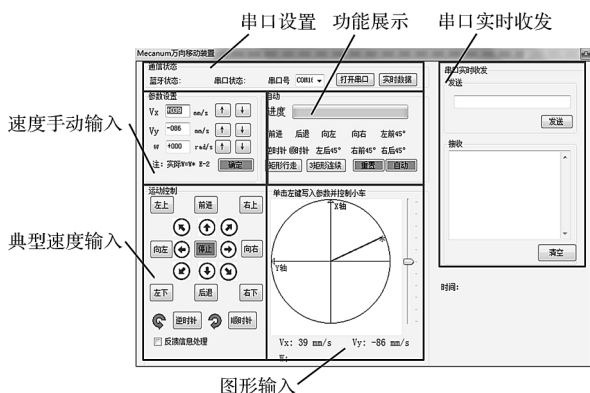


图 6 上位机控制界面

在主控制器的编程方面,使用 Keil u Vision5 的开发环境,采用了模块化的思想,在 main.c 文件中调用各个功能函数是通过含有各个功能模块的.h 头文件来实现的。该编程方法可有效降低程序的复杂度,也便于后期调试和维护。其主程序流程图如图 7 所示。

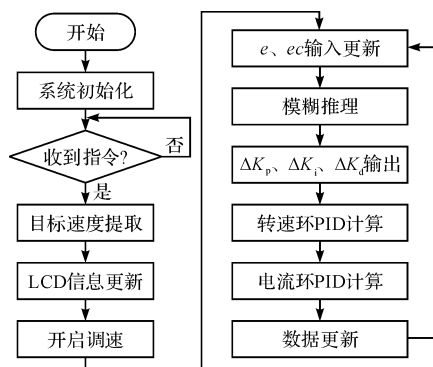


图 7 主程序流程图

主程序初始化一些功能模块后,通过串口状态判断是否成功接收到指令。若成功,则根据通信协议从指令中读取到平台的一系列控制参数,并自动计算出四轮の設定转速。平台运动过程中,控制器根据定时器中断所实现的采样时间  $T$  和四轮的实时转速,更新输入参数  $e$  和  $ec$ ,通过模糊 PID 自整定控制算法完成对小车的反馈控制。

## 3 实验分析

为验证本文所设计的嵌入式控制系统的实用性,以及模糊 PID 自整定算法的实际控制效果,笔者通过实验对平台样机运行的稳定性和重复性等方面进行综合评价。

### 3.1 实验方法

在划定的矩形范围内,本研究借助平台四边上安装的超声波传感器来实时获取其横向和纵向的运动距离,并通过 STM32 片内的数模转换器将电机转速转换为电压的变化,然后在示波器上得到系统的响应曲线,对比两种算法下的曲线即可直观地判断模糊 PID 自整定控制算法和常规 PID 控制算法的性能优劣。

### 3.2 控制算法比较

动态响应曲线如图 8 所示。

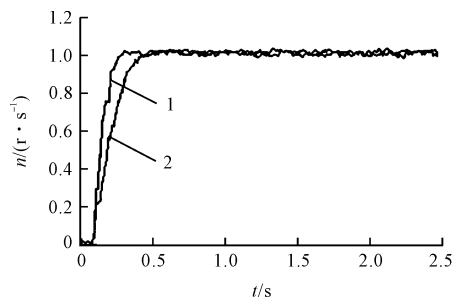


图 8 动态响应曲线

两种算法的超调量最后都能稳定在零左右,而曲线 1 上升所用的时间  $t$  相比于曲线 2 有明显的缩短,

分别为 0.21 s 和 0.35 s,说明模糊 PID 自整定控制算法可明显改善系统的动态响应特性。当平台行驶在凹凸地面时,借助模糊 PID 自整定控制算法可使实际运动轨迹与理论轨迹更吻合。

### 3.3 平台运动实验

为评估平台的运动性能,笔者在实验室条件下对其进行了直线运动等 4 项实验:

(1) 直线运动实验。本研究分别给平台设定 20 cm/s 和 10 cm/s 的运行速度,并通过超声波测距传感器探究实测前向距离与时间的关系。

不同速度时的直线运动图如图 9 所示。

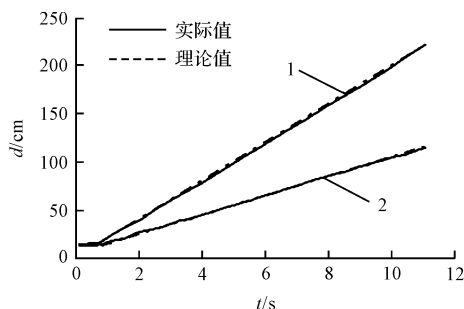


图 9 不同速度时的直线运动图

(2) 横向侧移实验。平台的前向距离  $d$  与时间  $t$  的关系曲线如图 10 所示。

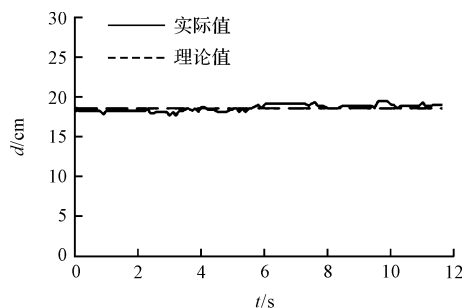


图 10 横向运动图

图 10 中虚线表明:理论上平台应不存在前向位移。因地面存在局部不平的现象,故而车轮会发生轻微“敲地”的实际情况,造成前向距离偏移 1 cm 以内。

(3) 斜 45° 直线运动实验。平台的实际轨迹与理论轨迹如图 11 所示。

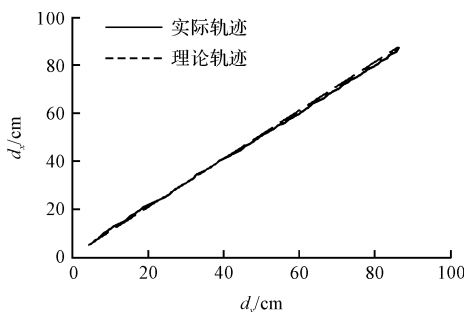


图 11 斜向运动图

由图 11 可见:两条曲线基本吻合,平台运行平稳。

(4) 3 次连续矩形运动的实验测试。通过该实验测得了多次行驶轨迹的重复性误差。由于平台的惯性,在转向时会产生些许横向与纵向上的偏移量,并伴有少量旋转。在第一次直角转弯后,由于平台在换向瞬间存在少许漂移现象而造成轨迹存在些许差异;在第三次直角转弯前,由于平台在做横向侧移运动时产生了细微偏差,也造成了轨迹有些许差异。

### 3.4 结果分析

经过以上 4 项实验,表明本文对全向移动平台的运动原理分析到位,运动学模型建模准确,验证了其全方位移动性能;所设计的控制系统稳定实用,所采用的模糊 PID 自整定控制算法效果良好。

需要指出:由于轮组加工、平台安装及传感器本身等方面存在的误差,加之地面不是完全平整等条件限制,导致前文所假设的条件无法完全实现,且平台的重心也并不位于几何中心,上述影响因素也是实验产生偏差的主要原因。

## 4 结束语

在为全向移动平台建立运动学模型的基础上,本研究设计了一套嵌入式控制系统;辅以模糊 PID 自整定控制算法,兼顾了运算量和 MCU 的工作性能,能够保证控制的实时性;采用蓝牙通信和液晶屏显示等措施便利了观察和调试,同时也提升了人机交互性;最后结合测距传感器,自主设计了一系列针对全向移动平台运动性能的测试。

实验结果表明:该平台运行效果良好;该全向移动平台结构紧凑、运动灵活稳定,具有原地旋转、横向侧移等特点。

### 参考文献(References):

- [1] 唐 炜,刘 勇,胡海秀,等.全向移动平台运动学分析及其自适应控制器设计[J].机械科学与技术,2017,36(6):883-889.
- [2] 陈文科,陈 志,王 志,等.万向电动底盘控制系统设计[J].农业机械学报,2013,44(6):19-23,34.
- [3] 张 翮,熊 睿,褚 健,等.一种全方位移动机器人的运动分析与控制实现[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(12):1650-1653,1672.
- [4] 王一治.适于楼宇环境的全方位移动技术研究[D].上海:上海大学电气工程及其自动化学院,2010.
- [5] CAMPION G, BASTIN G, DANDREA-NOVEL B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic mod-

- els of wheeled mobile robots [J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1996, 12(1): 47-62
- [6] 喻俊武, 星, 沈伟良. 基于 Mecanum 轮的全向运动视觉引导 AGV 研制 [J]. **机械设计与制造工程**, 2015, 44(9): 35-39
- [7] 刘中新, 张春亮, 王占富. 全方位移动平台运动分析与仿真 [J]. **机械与电子**, 2013(8): 16-19.
- [8] 张豫南, 田鹏, 王双双, 等. 采用 SolidWorks API 的全方位轮参数化实体建模 [J]. **现代制造工程**, 2013(2): 59-62.
- [9] GFRERRER A. Geometry and kinematics of the Mecanum wheel [J]. **Computer Aided Geometric Design**, 2008, 25(9): 784-791
- [10] TAN Xian-kun, SU Jing-bo, LI Lei. Fuzzy optimization and learning based parameter auto-tuning method for PID controller [J]. **Hydromechatronics Engineering**, 2013(24): 116-120.
- [11] 吴振顺, 姚建均, 岳东海. 模糊自整定 PID 控制器的设计及其应用 [J]. **哈尔滨工业大学学报**, 2004, 36(11): 1578-1580.
- [12] 蔡洪旺, 袁宋斌. 基于称量自校互补灌控制系统研究设计 [J]. **包装与食品机械**, 2017(1): 40-42.
- [13] KARASAKAL O, GUZELKAYA M, EKSIN I. Online tuning of fuzzy PID controller via rule weighing based on normalized acceleration [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2013(26): 184-197.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

章玮滨, 唐 炜. 一种 Mecanum 轮全向移动平台的设计 [J]. **机电工程**, 2018, 35(7): 679-684.ZHANG Wei-bin, TANG Wei. Design of omni-directional movement platform with mecanum wheel [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018, 35(7): 679-684.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 667 页)

(1) 采用小波变换将断铅原始声发射信号分解重构, 将时频域对应分析, 发现信号主要分布在 40 kHz ~ 110 kHz 和 200 kHz ~ 400 kHz, 将低频噪音信号剔除并准确提取断铅特征信息;

(2) 应用经验模态分解 EMD 将断铅声发射信号分解为 6 个固有模态函数 imf1 ~ 6, 分析得到了其幅值频率的分布。认为 imf1 ~ imf5 为断铅声发射信号, 而 imf6 为噪声;

(3) 采用短时傅里叶变换分析可以清楚的看到断铅声发射信号随时间在球墨铸铁中的衰减, 也可以清楚的分辨 10 kHz ~ 40 kHz 是噪声信号。

## 参考文献(References):

- [1] 郭力, 杜厚斌, 邓 喻. 硬质合金 PA30 高速深磨过程中声发射信号特征的变化研究 [J]. **金刚石与磨料磨具工程**, 2017, 37(3): 35-39
- [2] 张志强, 张国胜, 刘艳芳, 等. 断铅试验声发射信号处理与损伤源定位研究 [J]. **中国测试**, 2015, 41(8): 17-21
- [3] 陈苇波, 钟舜聪, 朱志彬, 等. 结构声发射的数值模拟及实验研究 [J]. **机电工程**, 2014, 31(5): 545-548
- [4] 马波, 陈健飞, 李 标, 等. 玻璃纤维复合材料板声发射信号传播特性 [J]. **无损检测**, 2017, 39(1): 16-19
- [5] 范博楠, 王海斗, 徐滨士, 等. 强背景噪声下微弱声发射信号提取及处理研究现状 [J]. **振动与冲击**, 2015, 34(16): 147-155
- [6] 关 山. 基于声发射信号的多特征分析与融合的刀具磨损分类与预测技术 [D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2011.
- [7] LIAO T W, TING C F, QU J, et al. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2007, 47(3-4): 580-592
- [8] LIAO T W. Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2010, 23(1): 74-84
- [9] CHEN X, ÖPÖZ T. Effect of different parameters on grinding efficiency and its monitoring by acoustic emission [J]. **Production & Manufacturing Research**, 2016, 4(1): 190-208

[编辑: 周昱晨]