

7-31-2020

## Design and Motion Control of Four-wheel Automotive Chassis Inspection Robot

Jue Zhu

*1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; ;*

Yongbin Huang

*1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; ;*

Zhang He

*2. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design and Motion Control of Four-wheel Automotive Chassis Inspection Robot

## Abstract

**Abstract:** The system structure of an automobile chassis inspection robot was introduced. *Furthermore the equation of motion state of robot was established and a decoupling controller was designed. The robot with omnidirectional wheel moving mechanism achieved the chassis image acquisition with wireless camera system and employed the active disturbance rejection controller for motion control. The robot has the characters of wide applicability, flexibility of platform movement, the stability of motion state, which can effectively compensate for the lack of traditional inspection methods, and a reasonable design in automobile chassis inspection is proved. The motion equation of state established for omnidirectional four-wheel mobile robot as well as disturbance rejection control method will have certain significance for other designs.*

## Keywords

chassis inspection, equation of state, auto disturbance rejection controller, decoupling control

## Recommended Citation

Zhu Jue, Huang Yongbin, Zhang He. Design and Motion Control of Four-wheel Automotive Chassis Inspection Robot[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1548-1555.

# 四轮式汽车底盘探伤机器人的设计及运动控制

朱珏<sup>1</sup>, 黄永斌<sup>1</sup>, 张贺<sup>2</sup>

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 宁波 315211; 2. 黑龙江工程学院, 哈尔滨 150050)

**摘要:** 介绍了一种汽车底盘探伤机器人的系统结构, 建立了机器人运动状态方程, 设计了解耦控制器。该机器人使用全向轮运动机构, 以无线摄像系统实现底盘图像采集并进行传输, 采用自抗扰控制器进行运动控制。仿真实验验证了该机器人具有使用范围广、平台移动灵活、运动状态平稳的特点, 可有效弥补传统探伤方法的不足。建立的四轮式全向移动机器人运动状态方程, 以及采用的自抗扰控制方法, 对于其他相关研究具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 底盘探伤; 状态方程; 自抗扰控制; 解耦控制

中图分类号: TP 242.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 07-1548-08

## Design and Motion Control of Four-wheel Automotive Chassis Inspection Robot

Zhu Jue<sup>1</sup>, Huang Yongbin<sup>1</sup>, Zhang He<sup>2</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China)

**Abstract:** The system structure of an automobile chassis inspection robot was introduced. Furthermore the equation of motion state of robot was established and a decoupling controller was designed. The robot with omnidirectional wheel moving mechanism achieved the chassis image acquisition with wireless camera system and employed the active disturbance rejection controller for motion control. The robot has the characters of wide applicability, flexibility of platform movement, the stability of motion state, which can effectively compensate for the lack of traditional inspection methods, and a reasonable design in automobile chassis inspection is proved. The motion equation of state established for omnidirectional four-wheel mobile robot as well as disturbance rejection control method will have certain significance for other designs.

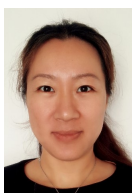
**Keywords:** chassis inspection; equation of state; auto disturbance rejection controller; decoupling control

## 引言

汽车底盘安全对驾驶安全至关重要。汽车底盘长期暴露在空气中, 浸渍酸性污水, 极易发生锈蚀, 不良路况也会使底盘发生刚蹭。目前, 对于汽车底盘创伤检查, 多数维修人员使用车下目测的方

法。长时间仰视容易导致颈椎疲劳拉伤, 举升机的机械动作与车下狭小的工作环境也威胁着检测人员的人身安全。因此设计适应车下工作环境, 以及能够实时获取汽车底盘创伤细节的高效率移动检测平台具有重要的应用价值。

为了提高移动平台的移动效率, 一般采用全向轮作为运动机构, 而关于全向轮的研究与应用已有很多。瑞典的 Mecanum(麦克纳姆)公司最早设计了麦克纳姆轮, 并依此申请了专利。在应用方面, 美国 Aiftax 公司最早将麦克纳姆轮使用在商业化车



收稿日期: 2014-05-14 修回日期: 2014-06-12;  
基金项目: 第 47 批教育部留学回国人员科研启动基金; 浙江省自然科学基金(LY13A020007); 浙江省教育厅(理)(Y201121000);  
作者简介: 朱珏(1979-), 女, 浙江金华人, 副教授, 研究方向为汽车探伤, 冷弯钢结构的稳定性分析。

<http://www.china-simulation.com>

• 1548 •

辆上。美国卡内基·梅隆大学的 Muir、Neuman 等研制出具有 4 个 Mecanum 轮的全方位移动机器人 URANUS, 该机器人可在地面上自主运动。国防科技大学海丹、刘玉鹏等重新设计了 Mecanum 轮, 并依此申请了全向轮专利<sup>[1]</sup>。在理论研究方面, Patrick Muir 运用矩阵变换法建立了麦克纳姆轮的运动学模型<sup>[2]</sup>; Jorge 比较了传统车轮与麦克纳姆轮的不同, 给出了麦克纳姆轮的运动学与动力学方程<sup>[3-4]</sup>; Olaf Diegel 改进了麦克纳姆轮的设计, 提高了车轮的效率; A Gferrer 分析了其几何特性, 研究了麦克纳姆轮的运动性能<sup>[5]</sup>; 国内学者王一治讨论了使用麦克纳姆轮来实现全方位运动的条件<sup>[6]</sup>。还有其他诸多文献<sup>[7-11]</sup>涉及麦克纳姆轮的研究。虽然已有关于全向轮运动规律和应用的大量研究, 但未见将其应用在汽车底盘探伤机器人的相关案例, 也未见针对汽车底盘探伤的相关机器人的相关文献。

本文针对汽车底盘探伤问题, 设计了底盘探伤机器人, 采用全向轮移动机构, 能较好得适应车下狭小的工作环境; 对底盘图像数据的采集, 可以辅助维修人员对汽车底盘出现的锈蚀、刮蹭、创痕等做出识别; 采用自抗扰控制器, 可以实现灵活、平稳的运动控制。汽车底盘创伤机器人的设计可以很好地解决目前汽车底盘创伤检测中存在的问题, 具有很大的实用价值。

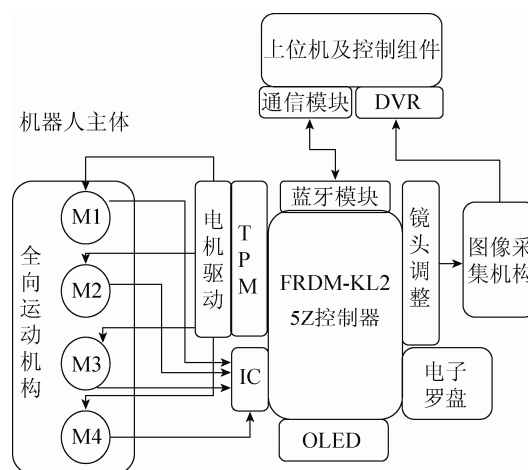
## 1 机器人总体结构和工作原理

机器人主体分成 3 个部分: 全向运动机构、控制机构和图像采集机构, 如图 1 所示。

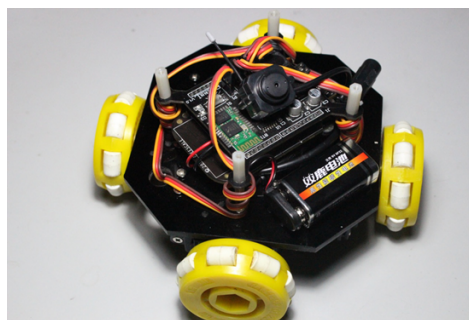
(1) 全向运动机构 全向运动机构采用互补式全向轮, 以避免非互补结构全向轮在底盘图像采集时机构产生震动<sup>[12]</sup>, 影响图片采集质量。同时选择四轮底盘作为机构平台, 底盘配有 4 台 360° 直流舵机, 舵机轴线交于平台中心点, 相邻轴线夹角为 90°。

(2) 控制机构 控制系统含有 PWM 控制、电子罗盘、蓝牙通信等功能模块。系统选用 Kinetic KL25Z 控制器为主控, 利用 TPM 模块的 PWM 功

能模块驱动舵机, 并利用 IC 功能来测得转速数据, 对速度实现闭环调控。控制器同时集成 3 轴数字罗盘 HMC5883L, 以此监测平台实际位置, 并用 GPIO 模拟 4 线 SPI, 驱动 12864OLED 显示屏, 显示机器人实时运动参数。控制器设计中添加了蓝牙通信功能, 利用 UART 与蓝牙串口模块的无缝连接, 可实现 PC 平台及 Android 平台对机器人的实时控制和数据的实时获取。功能模块的使用, 保证了控制器电路设计简单可靠, 经实验证明控制机构整体工作状态良好, 通信数据传输速率稳定, 能满足对底盘探伤的控制要求。



(a) 机器人系统结构



(b) 实验机

图 1 机器人系统结构和试验机

(3) 图像采集机构 图像采集机构含有无线摄像头、无线传输、DVR 数据接收等模块。系统选用 380 线无线摄像头, 该类型摄像头采用 1/3 inch CMOS 图像传感器, 可采集 PAL 电视格式图像。摄像头工作电压高于全向运动机构的工作电

压, 使用 9V 组合电池为其独立供电。无线传输模块的理论传输距离为 50 m, 在障碍物存在情况下可保持 15 m 以上的有效传输距离, 能够将图像实时上传保存。配合使用微型 DVR 接收设备进行数据接收, DVR 支持图片、声音和影像在内的多种数据形式, 具备最多 4 个通道的多通道数据采集能力, 多通道采集模式可缩短底盘创伤的检查周期。DVR 同时配有 A/V 外接信号采集装置。

## 2 机器人硬件设计

本设计中最重要 2 个硬件设计分别为主控芯片与电子罗盘。采用的主控芯片为飞思卡尔公司 (Freescale™ Semiconductor) 最新的基于 ARM® Cortex™-M0+ 内核的 32 位低成本 KL25Z128VLK4, 并使用基于该芯片的 FRDM\_KL25Z 开发板。该开发板使用 K20DX128VFM5 桥接芯片, 组成开放式嵌入式标准串行调试适配器 (Open Embedded Standard Serial Debug Adapter, OpenSDA)。OpenSDA 是由 P&E 公司所开发的一种针对微控制器芯片的低成本调试和编程接口, 在主机 USB 口和目标板上的微控制器之间建立串行的通信。

该调试器可在没有下载器的情况下对芯片调试仿真, 同时也可通过 USB 连接目标芯片。将调试器的自带文件 MSD Boot loader 刷写在 K20DX128VFM5 芯片内, 可作为芯片的启动系统, 同时通过编写标识为 OpenSDA Application 的应用程序文件, 可使仿真程序运行在 OpenSDA 中。该调试器的上述运行方式有利于机器人原型的快速开发和周期的缩减, 降低调试难度。

本设计选用霍尼韦尔 HMC5883L 型电子罗盘, 该款电子罗盘主要应用于低成本磁场检测领域。主控芯片通过 IIC 接口与电子罗盘建立通信, 对相关寄存器进行初始化, 读取沿  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的磁场强度。本设计中机器人移动平台在二维平面内运动,  $z$  方向磁场强度不需考虑, 令  $x$ ,  $y$  方向的磁场强度为  $x_{ad}$ ,  $y_{ad}$ , 则由以下转换得到转角

$$\text{angle} = \tan^{-1}(y_{ad} / x_{ad}) \times 180 / \pi \quad (1)$$

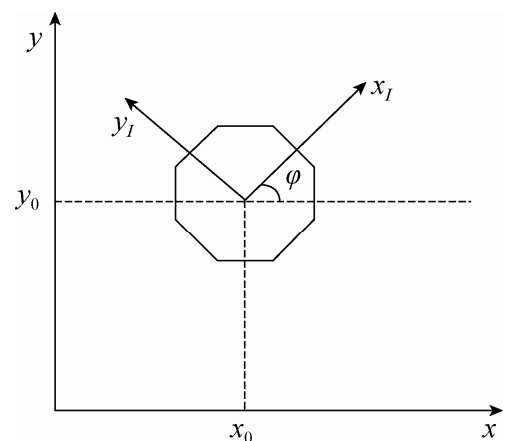
由此可得相应的角速度为

$$\omega = d(\text{angle}) / dt \quad (2)$$

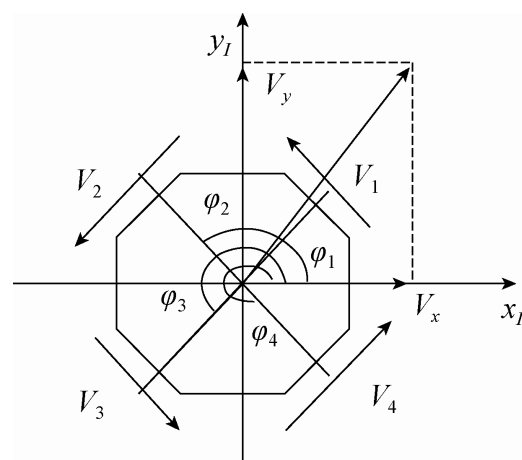
## 3 机器人状态方程

实现对机器人的控制, 需要了解机器人的运动规律, 建立机器人运动的相关状态方程。诸多文献对全向轮的运动机理进行了研究, 文献[13]建立了三轮式全向移动机器人的运动状态方程, 但本文的四轮式机器人的运动状态和上述研究有显著差别, 本节将针对本文的四轮式探伤机器人建立运动状态方程。

根据底盘布局建立全局坐标系  $xoy$  和全向移动平台坐标系  $x_I O y_I$ , 如图 2 所示。



(a) 机器人质心定位



(b) 机器人主动轮速度示意图

图 2 机器人运动参量示意

设在运动平面坐标系  $xoy$  运动状态可记为  $(x \ y \ \varphi)^T$ , 其中  $(x \ y)$  为机器人质心在  $xoy$  的定位坐标,  $\varphi$  为坐标系  $x_1Oy_1$  与  $xoy$  的夹角, 逆时针方向为正, 顺时针方向为负。可知 2 坐标系下的速度转换关系为

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据图 2(a), 经速度分解可以得到

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\phi_1 & \cos\phi_1 & R \\ -\sin\phi_2 & \cos\phi_2 & R \\ -\sin\phi_3 & \cos\phi_3 & R \\ -\sin\phi_4 & \cos\phi_4 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ \varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中:  $V_1, V_2, V_3, V_4$  分别为 4 个全向轮的线速度;  $V_x, V_y, \varphi$  为机器人质心的运动参量;  $R$  为全向轮中心与平台中心距离;  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$  分别为全向移动平台坐标系中 4 个轮轴与  $x_1$  轴正方向的夹角。由式(3), (4)整理可得:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\phi_1 + \varphi) & \cos(\phi_1 + \varphi) & R \\ -\sin(\phi_2 + \varphi) & \cos(\phi_2 + \varphi) & R \\ -\sin(\phi_3 + \varphi) & \cos(\phi_3 + \varphi) & R \\ -\sin(\phi_4 + \varphi) & \cos(\phi_4 + \varphi) & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} \quad (5)$$

令  $V = (V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4)^T$ ,  $V_I = (V_x \ V_y \ \varphi)^T$  针对本文设计的探伤机器人, 可以具体给出

$$V = J \cdot V_I \quad (6)$$

$$\text{其中 } J = \begin{pmatrix} -\sin(\frac{\pi}{4} + \varphi) & \cos(\frac{\pi}{4} + \varphi) & R \\ -\sin(\frac{\pi}{4} - \varphi) & -\cos(\frac{\pi}{4} - \varphi) & R \\ \sin(\frac{\pi}{4} + \varphi) & -\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi) & R \\ \sin(\frac{\pi}{4} - \varphi) & \cos(\frac{\pi}{4} - \varphi) & R \end{pmatrix}$$

矩阵  $J$  非方阵, 为了由轮子速度获得机器人运动速度, 使用伪逆矩阵法求解, 伪逆矩阵方程为

$$V_I = J^+ \cdot V \quad (7)$$

$$V_I = r \cdot J^+ \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

其中:  $\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4)^T$ , 为 4 个主动轮的转速向量;  $J^+ = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T$  为  $J$  的伪逆矩阵;  $r$  为

全向轮主动轮的半径。

参照文献[13]中的方法, 令探伤机器人的拉格朗日函数为  $K$

$$K = \frac{1}{2}m(V_x^2 + V_y^2) + \frac{1}{2}J_z\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}J_I(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + \dot{\theta}_4^2) \quad (9)$$

式中:  $K$  为机器人整体的总能量;  $m$  为机器人总质量;  $J_z$  为机器人绕  $z$  轴转动时的转动惯量;  $J_I$  为全向轮绕其转动中心转动时的转动惯量。根据拉格朗日第 2 类方程的一般形式得

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} = \tau_i - \tau_{Di} \quad (10)$$

其中:  $\tau_i (i=1,2,3,4)$  是电机向 4 个全向轮提供的转矩;  $\tau_{Di} = D_{\theta i} \cdot \dot{\theta}_i$  为第  $i$  个轮子所受的阻力矩,  $D_{\theta i} (i=1,2,3,4)$  为轮子所受阻力的粘性系数。令  $\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4)^T$ , 将式(9)代入式(10), 可得方程

$$\tau = M\ddot{\theta} + D_{\theta}\dot{\theta} \quad (11)$$

$$\text{式中: } D_{\theta} = \begin{pmatrix} D_{\theta 1} & & & \\ & D_{\theta 2} & & \\ & & D_{\theta 3} & \\ & & & D_{\theta 4} \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} A+B+C & B & B-A & B \\ B & A+B+C & B & B-A \\ B-A & B & A+B+C & B \\ B & B-A & B & A+B+C \end{pmatrix}$$

矩阵  $M$  中  $A = mr^2, B = J_I r^2 / 16R^2, C = J_z$ 。因此由式(11)可以得到

$$\ddot{\theta} = -M^{-1}D_{\theta}\dot{\theta} + M^{-1}\tau \quad (12)$$

这里可以直接给出

$$V = r \cdot \dot{\theta} \quad (13)$$

将机器人在运动平面坐标系  $xoy$  运动状态记为  $X = (x \ y \ \varphi)^T$ , 根据以上推导并结合式(6), (8), (12), (13)可以得到

$$\dot{X} = (J^+J - J^+M^{-1}D_{\theta}J)\dot{X} + rJ^+M^{-1}\tau \quad (14)$$

式中:  $J^+$  表示矩阵  $J^+$  中各项的导数构成的矩阵。式(12), (14)统称为汽车底盘探伤机器人的状态方程。

### 4 自抗扰控制器设计

机器人各轮受到的摩擦力不同,沿不同方向的运动特性存在很大差异,使用传统控制器对全向轮机器人实现多变量解耦控制有很大难度。为了获得良好的运动控制性能,采用自抗扰控制器<sup>[14]</sup>(Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)对机器人进行解耦控制。ADRC 用误差反馈来消除误差,分为安排过渡过程、非线性反馈、扩张状态观测器等环节,可对系统扰动进行精确估计和补偿,解决了传统控制器系统快速响应与系统超调量间的矛盾,具有极强的鲁棒性和适应性。

#### 4.1 自抗扰控制器构成

本文探伤机器人为三维二阶受控对象,采用自抗扰控制器并联控制,如图 3 所示。单通道的自抗扰控制器具体组成如下:

##### (1) 安排过渡过程

对于输入信号  $v$ ,其跟踪-微分器输出 2 个信号  $v_1$  和  $v_2$ ,其中  $v_1$  为  $v$  的跟踪信号, $v_2$  为  $v$  的微分信号。跟踪-微分器的函数形式为

$$\begin{cases} v_1 = v_1 + h \cdot v_2 \\ v_2 = v_2 + h \cdot fst(v_1 - v, v_2, s, h_0) \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $h$  为采样周期;  $s$  为速度因子;  $h_0$  为滤波因子;  $fst$  函数有下式定义

$$fst(v_1 - v, v_2, s, h_0) = \begin{cases} \frac{-s \cdot a}{d} & |a| \leq d \\ -s \cdot sign(a) & |a| > d \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} v_2 + \frac{v_3}{h_0} & |v_3| \leq d_0 \\ v_2 + \frac{1}{2}(a_0 - d) \cdot sign(v_3) & |v_3| > d_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$d = s \cdot h_0, d_0 = d \cdot h_0,$$

$$v_3 = (v_1 - v) + h_0 \cdot v_2, a_0 = \sqrt{d^2 + 8s|v_3|}$$

可以知道速度因子  $s$  和滤波因子  $h_0$  是影响安排过渡过程性能的关键。

##### (2) 扩张状态观测器

ESO 是自抗扰控制器的核心部分。扩张状态观测器的方程组为

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ z_1 = z_2 - \beta_1 \cdot fal(e, \alpha_1, \delta) \\ z_2 = z_3 - \beta_2 \cdot fal(e, \alpha_2, \delta) + b_0 u \\ z_3 = \beta_3 \cdot fal(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $y$  为被控输出;  $u$  为控制量;  $b_0$  为已知常数;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  为扩张状态观测器参数;  $\delta$  为  $fal$  函数参数;  $z_1, z_2$  为各变量的观测量,  $z_3$  为系统的扩张状态总观测量。函数  $fal$  有以下定义:

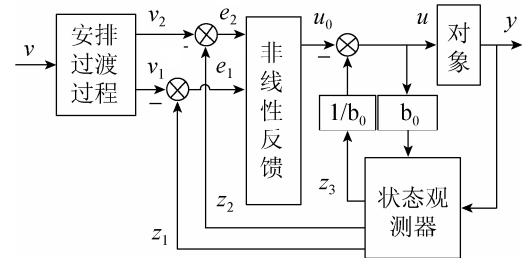
$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha sign(e) & |e| > \delta \geq 0 \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (18)$$

##### (3) 非线性状态误差反馈:

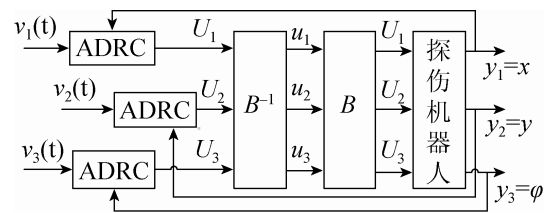
非线性反馈采用以下函数形式

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = k_1 \cdot fal(e_1, \alpha_1, \delta) + k_2 \cdot fal(e_2, \alpha_2, \delta) \\ u = u_0 - z_{n+1} / b_0 \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $k_1, k_2; \alpha_1, \alpha_2$  为非线性误差反馈环节参数,且通常有  $0 < \alpha_1, \alpha_2 < 1$ 。



(a) 单通道自抗扰控制器结构



(b) 多通道并行解耦自抗扰控制器结构

图 3 自抗扰控制器结构

#### 4.2 基于自抗扰控制器的多变量解耦控制

本文导出的机器人状态方程对应的多输入-多输出系统为

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{X}} = (\dot{\mathbf{J}}^+ \mathbf{J} - \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D}_\theta \mathbf{J}) \dot{\mathbf{X}} + r \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{X} \end{cases} \quad (20)$$

若令  $\begin{cases} x_1 = x \\ x_2 = y \\ x_3 = \varphi \end{cases}$  其中  $(x \ y \ \varphi)^T$  为机器人在运动平面坐标系  $xoy$  运动状态, 并令

$$\mathbf{f} = (\dot{\mathbf{J}}^+ \mathbf{J} - \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D}_\theta \mathbf{J}) \dot{\mathbf{X}} = (f_1 \ f_2 \ f_3)^T$$

则有  $\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ ,  $\mathbf{Y} = (y_1 \ y_2 \ y_3)^T$

引入虚拟控制量

$$\mathbf{U} = r \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1} \boldsymbol{\tau} = (U_1 \ U_2 \ U_3)^T$$

则系统第  $i$  通道的输入输出关系变为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, x_3; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3) + U_i \\ y_i = x_i \end{cases} \quad (21)$$

即第  $i$  通道上的系统输入为  $U_i$ , 系统输出为  $y_i$ , 每个通道的虚拟控制量  $U_i$  与被控输出  $y_i$  是单输入-单输出关系, 实现了原多输入-多输出系统的完全解耦控制。当被控量期望值给定并且实际值可测时,  $U_i$  与  $y_i$  间可嵌入自抗扰控制器实现控制。

如图 3(b), 控制量  $\mathbf{U}$  和输出向量  $\mathbf{Y}$  之间并行嵌入 3 个自抗扰控制器可实现机器人的解耦控制。实际控制量为  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4)^T$ , 则实际控制量可由  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{B} = \mathbf{J}^+ \mathbf{M}^{-1}$  给定, 这样便获得了机器人电机实际所需要输出的转矩值。

## 5 机器人自抗扰控制器仿真验证

利用 MATLAB 软件编程, 对自抗扰控制器的解耦控制进行了仿真验证。作为对比, 使用串级 PID 控制器对机器人进行控制。

如图 4 串级 PID 控制系统所示, 在串级 PID 控制系统中, 主调节根据电子罗盘  $x$  轴,  $y$  轴磁场分量的变化进行控制, 输出包括移动平台  $x$  轴与  $y$  轴的运动速度及绕  $z$  轴转动的角速度。由速度耦合关系可得到 4 个驱动轮的线速度, 副调节根据线速度的变化对各个驱动轮进行速度调节。串级 PID 控制器参数整定与一般 PID 控制器参数整定方法一致。最终整定的参数为主调节  $K_P =$

7.5,  $K_I = 0$ ,  $K_D = 16.5$ , 副调节的参数为  $K_P = 0.7$ ,  $K_I = 4$ ,  $K_D = 0$ 。

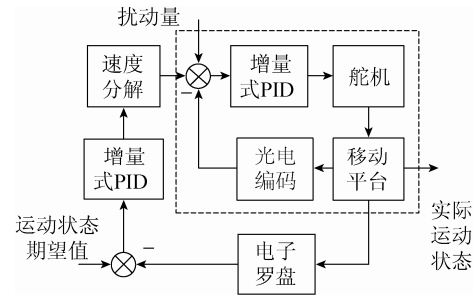


图 4 串级 PID 控制系统

自抗扰控制器具有强鲁棒性, 故 3 个通道采用统一的控制器, 3 个控制器具有相同的参数设置。控制器部分参数的选取方法为试凑法, 式(15), (19) 中相关参数最终整定为  $h=h_0=0.0025$ ,  $s=50000$ ,  $\delta=0.01$ ,  $k_1=350$ ,  $k_2=200$ 。根据文献[14], 式(17) 中的参数取  $\beta_1=1/h$ ,  $\beta_2=1/(1.6h^{1.5})$ ,  $\beta_3=1/(8.6h^{2.2})$ 。根据文献[15]中所述方法给定机器人各项参数:  $m=11.5 \text{ kg}$ ,  $J_z=0.36 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $J_l=0.0125 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $D_{\theta 1}=D_{\theta 2}=D_{\theta 3}=D_{\theta 4}=0.0155$ ,  $R=0.33 \text{ m}$ ,  $r=0.11 \text{ m}$ 。

下面给出一组典型仿真结果。

图 5 是机器人在串级 PID 以及 ADRC 控制下, 保持圆形运行轨迹并保证自身无旋转的仿真响应图。由图 5 可知, 与串级 PID 控制相比, ADRC 解耦控制使系统具有良好的动态性能, 在附加正弦扰动与突然扰动后能很快的进行调整, 较传统 PID 控制器有响应速度快特点, 且控制过程中运行平稳。图 6 是机器人在串级 PID 以及 ADRC 控制下, 在运动过程中保持自身无旋转的仿真响应图。从图 6 可知, 与串级系统 PID 相比, ADRC 解耦控制使系统具有良好的稳态性能, 即使附加正弦干扰, 仍能保持极佳的稳态精度, 较传统控制器具有抗干扰性能强的特点。

数组仿真实验证明, 自抗扰控制器具有响应速度快、抗干扰性强、稳态精度高等优点, 对本文设计的机器人能够实现良好的解耦控制, 满足该机器人运动控制的实际需要。



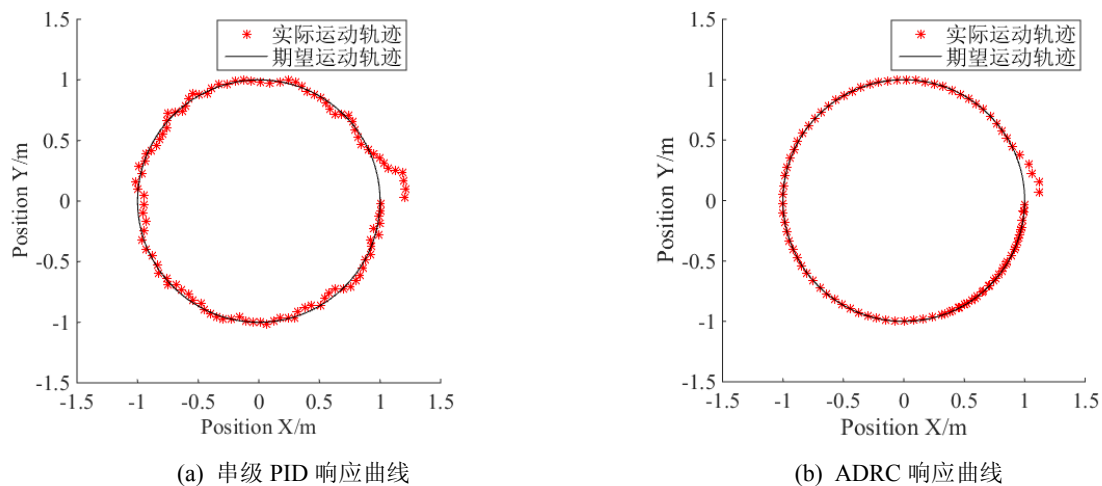


图 5 干扰下跟踪圆形运行轨迹响应曲线

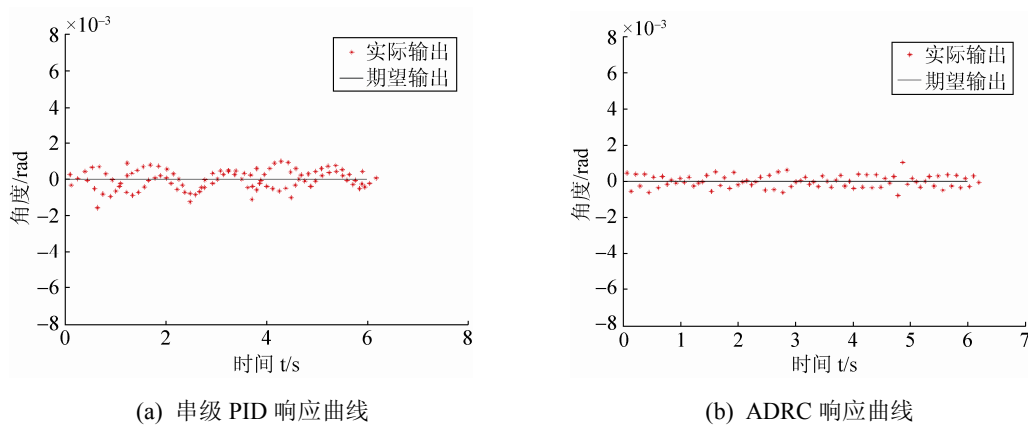


图 6 干扰下跟踪 0° 响应曲线

## 6 结论

综上所述, 本文可以得出以下结论:

(1) 针对四轮式全向移动机器人建立的运动状态方程, 使同类机器人的控制问题有了理论基础, 同时对于其他相关研究也具有一定的借鉴意义;

(2) 采用自抗扰控制方法, 响应速度快, 抗干扰能力强, 稳态精度高, 容易实现机器人的解耦控制, 具有优良的控制性能, 可对探伤机器人进行灵活地控制。

(3) 仿真实验证明, 本文提出的汽车底盘探伤机器人的机构设计合理, 机器人尺寸适宜, 并且全向轮移动机构无需转弯半径, 能较好地克服车下空间狭小、不便运动的问题;

上述 3 方面设计使汽车底盘探伤机器人具备了使用范围广、平台移动灵活、运动状态平稳的特点, 可成为替代传统探伤方式的有效工具。同时该探伤机器人成本极低, 在辅助维修人员进行汽车底盘创伤检测中具有很大的应用前景与实用价值。

## 参考文献:

- [1] 中国人民解放军国防科技大学. 全向轮[P]. 中国: 200520052595, 2007-01-10.
- [2] Muir P F, Neuman C P. Kinetic modeling for feedback control of an Omni-direction wheeled mobile robot [C]// Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh, NC, USA: Computer Society Press of the IEEE, 1987: 1772-1778.
- [3] Jorge A. 机器人机械系统原理: 理论、方法和算法[M]. 宋伟刚, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.

- [4] Diegel O, Badve A. Improved mecanum wheel design for Omni-directional robots [C]// Proceedings of 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation. Auckland, New Zealand: ARAA, 2002: 117-121.
- [5] Gferrer A. Geometry and kinetics of the Mecanum wheel [J]. Computer Aided Geometric Design (S0167-8396), 2008, 25(9): 784-791.
- [6] 王一治, 常德功. Mecanum 四轮全方位轮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.
- [7] 姚冬冬, 闵华松. 三轮全向移动机器人的研究与设计[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(4): 2163-2169.
- [8] 周卫华, 王班, 黄善军, 等. 单排连续切换全向移动机器人的布局方式与运动的稳定性分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(7): 888-894.
- [9] 周卫华, 王班, 郭吉丰. 连续切换及其移动机器人的自锁特性[J]. 机器人, 2013, 35(4): 449-456.
- [10] Pai Neng-Sheng, Hsieh Hung-Hui, Lai Yi-Chung. Implementation of obstacle-avoidance control for an autonomous Omni-directional mobile robot based on extension theory [J]. Sensors (S1424-8220), 2012, 12(10): 13947-13963.
- [11] 夏国庆. Mecanum 轮全向移动机器人研制[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [12] 刘磊, 徐晓明. 带 Mecanum 轮的移动机器人全向移动控制研究[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(增 1): 66-72.
- [13] 曹其新, 张蕾. 轮式自主移动机器人[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [15] 储健, 王仲民, 邴志刚, 等. 全向移动机器人轮系的运动参数计算[J]. 天津科技大学学报, 2004, 19(2): 37-40.

(上接第 1519 页)

- [13] Shen X, Wu Y. A unified approach to salient object detection via low rank matrix recovery [C]// Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. USA: IEEE, 2012: 853-860.
- [14] Liu T, Yuan Z, Sun J, *et al.* Learning to detect a salient object [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2011, 33(2): 353-367.
- [15] Hou X, Zhang L. Saliency detection: A spectral residual approach [C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07, IEEE Conference on. USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [16] Harel J, Koch C, Perona P. Graph-based visual saliency [C]// Advances in Neural Information Processing Systems. 2006: 545-552.
- [17] Achanta R, Hemami S, Estrada F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection [C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009, IEEE Conference on. USA: IEEE, 2009: 1597-1604.
- [18] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2004, 26(9): 1124-1137.