

# 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验

张京<sup>1</sup>, 陈度<sup>1\*</sup>, 王书茂<sup>1</sup>, 胡小安<sup>2</sup>, 王冬<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

**摘要:** 针对一般农用轮式机器人转向方式单一、难以适应田间复杂作业环境以及推广应用成本较高等问题, 该文设计了一种农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统, 采用模块化设计方法构建了该控制系统的底层硬件部分, 结合控制器局域网络(controller area network, CAN)总线、串口通讯和传感器技术实现了该机器人移动轮转角、转速等数据的采集功能且应用了有效的硬件电路隔离保护方案; 基于低速阿克曼四轮转向模型与比例积分微分(proportion, integration, differentiation, PID)控制算法分析并验证了该机器人四轮独立转向驱动控制策略的有效性。试验结果表明: 该机器人能够通过上位机或遥控器实现其四轮独立转向与转速控制功能, 移动轮在0~360°转向过程中, 控制效果鲁棒性强、稳定且转角控制的最大平均绝对误差为0.10°, 通过上位机设定转速后经0.5~1 s左右, 移动轮转速达到稳态, 并具有较高转速控制精度。该研究为农用轮式机器人的四轮独立转向驱动控制方法提供了参考。

**关键词:** 机械化; 机器人; 控制系统; 四轮转向; 模块化设计

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.010

中图分类号: TP274.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0063-08

张京, 陈度, 王书茂, 胡小安, 王冬. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 63-70. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.010 http://www.tcsae.org

Zhang Jing, Chen Du, Wang Shumao, Hu Xiaohan, Wang Dong. Design and experiment of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 63-70. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.010 http://www.tcsae.org

## 0 引言

由于农业生产劳动力的逐步缺乏, 中国农用机器人的发展十分迅速, 其中轮式移动机器人是较为典型、且量大面广的一种<sup>[1]</sup>。目前, 农用轮式机器人主要应用于果实采摘、套袋、植保以及农机具搭载等方面, 为减少劳动力、提高农业生产效率提供了有效的解决办法<sup>[2]</sup>。因此, 如何进一步提高农用机器人的应用水平, 从而适应复杂农田环境下的作业需求, 已成为国内外学者的研究重点。

Min H K 等<sup>[3]</sup>论述了温室全向移动喷药机器人的设计过程, 并采用遗传算法优化了机器人的控制系统; 而 Giovana T T 等<sup>[4]</sup>则基于液压系统和控制器局域网络(controller area network, CAN)总线技术设计了一种农用轮式机器人, 采用分布式控制算法解决了液压系统转向控制延时等问题; 张铁民等<sup>[5]</sup>研究了农用轮式移动小车在实际不同负载和路况下的工作能力, 并分析了每个驱动电机的转矩分配情况。但目前国内面向农用机器人移动方式的研究还主要侧重于两轮驱动控制以及差动转向等控制方法<sup>[6]</sup>, 从移动性能的角度使农用机器人自身对于工

况的适应能力受到了一定限制<sup>[7]</sup>。另一方面, 部分四轮独立驱动农用机器人研究则是主要基于微小型或室内应用等方面<sup>[8]</sup>, 不能满足农用机器人田间作业的实际载荷需求且缺乏合理的生产制造模式, 导致农用机器人的应用推广难度较大<sup>[9]</sup>。因此为了解决农用轮式机器人在田间等复杂环境情况下灵活性及适应能力较低等问题, 展开了针对四轮独立转向驱动控制系统的设计与试验。

本文针对农田复杂环境因素以及农用机器人转向平台多元化等实际需求, 设计了农用机器人四轮独立转向驱动控制系统, 并根据模块化设计方法构建了该控制系统的硬件部分, 详细阐述了该机器人四轮独立转向驱动控制方法的原理与执行效果, 以期为农用轮式机器人在复杂环境下的应用提供参考。

## 1 农用轮式机器人总体设计

本文中农用轮式机器人的机体主要由3个大部分构成, 分别为机器人行走底盘、供电系统以及电气与计算机控制系统, 设计任务承载质量大于等于100 kg, 整机自身质量540 kg, 作业行走速度3.6 km/h。该机器人底盘外观情况如图1所示。

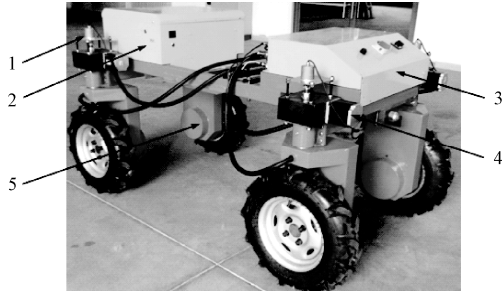
由于考虑到田间作业环境复杂多变, 土壤墒情、农田地貌以及各种农作物种植情况不同, 要求机器人在田间需要具有足够的动力性能和良好的移动性能, 因此采用高地隙底盘结构<sup>[10]</sup>, 底盘距地面高度75.5 cm, 前后轮轴距156 cm, 左右轮距97 cm, 且为了增加机器人的应用扩展能力, 使电源与机箱之间预留66.5 cm间隔, 方便安

收稿日期: 2015-06-05 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2013AA102406); 北京市科技计划课题(D151100003715001)

作者简介: 张京, 男, 北京, 博士生, 主要从事农业智能化检测与控制技术研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: cathy64882584@163.com  
\*通信作者: 陈度, 男, 北京, 博士, 工程师, 主要从事机电一体化及测控技术研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: tchendu@cau.edu.cn

装机械臂或液罐,从而实现机器人行走过程中的采摘或喷药等任务<sup>[1]</sup>。采用上述外观设计方案对于该机器人四轮独立转向驱动控制功能的实现亦起到一定优化作用,使机器人移动轮在 360°转向的过程中都不会受到底盘的影响,并能够更为良好的适应农田复杂环境下的作业方式<sup>[12]</sup>。



1. 角度传感器 2. 电池 3. 机箱 4. 转向电机 5. 行走电机  
1. Angle sensor 2. Battery 3. Chassis 4. Steering motor 5. Walking motor

图 1 农用轮式机器人底盘外观

Fig.1 Chassis appearance of agricultural wheeled robots

农用轮式机器人采用四轮独立转向驱动行走方式,每个移动轮行走与转向功能的实现都需要依靠 2 个不同的电机来完成。根据其自身质量、行驶阻力、爬坡性能、动力匹配等因素,通过理论计算与经验分析,选用北京鼎誉通科技发展有限公司生产的 DYT-48 型行走电机,额定功率 1 kW,以及 DYT-45 型转向电机,额定功率 0.2 kW,2 种电机都为无刷直流型(brushless direct current, BLDC)电机,其工作电压为 48 V。此外,为了进一步增加机器人的额外负载能力,增强其动力性能,并同时克服不同工况下的惯性与摩擦阻力,还配备了减速器<sup>[13]</sup>,其减速比为 1/50。

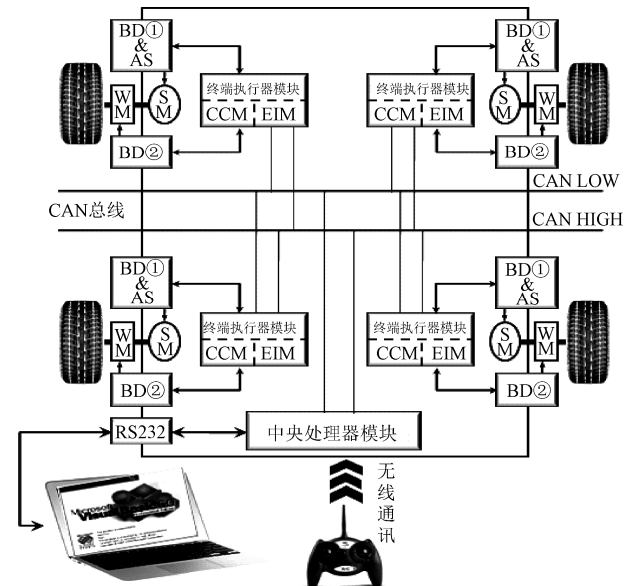
本文中的农用轮式机器人集成了四轮独立转向驱动控制、角度与转速检测等功能,因此该机器人所具有的外部设备主要包括:1) 电池,选了一个 48 V 的铅酸电池,该电池的容量为 200 Ah,具有 4 h 以上的续航能力;2) 电机驱动器,主要包括行走电机驱动器和转向电机驱动器 2 种,且都可以实现电机的 PWM (pulse width modulation, 脉冲调制) 调速、使能、反转和霍尔转速信号输出等功能;3) 角度传感器,选用北京飞博尔电子有限公司生产的 BL50-R 系列角度传感器,应用变压器原理进行无触点测角,精度可达 0.33' (约为 0.006°),具有耐高温、抗振动以及 RS232 串口输出等众多优势。外部设备的走线全部在机器人机箱内部完成,为了避免过度的线材堆积导致排查困难以及信号干扰等问题的发生,使机箱内部的线材尽量贴近机箱的外壳部分<sup>[14]</sup>,且令走线方式清晰明确。

## 2 四轮控制系统硬件结构设计

本文基于农用轮式机器人转向平台多元化、适用于田间复杂化作业以及模块化结构设计方法等关键因素,根据动力合理分配、能量利用效率高以及较快响应速度等控制需求<sup>[15]</sup>,设计了四轮独立转向驱动控制系统的硬件部分,使该机器人的移动速度可实现在 0~3.6 km/h 内

连续可调,且能够较为流畅的完成四轮独立转向与移动等任务。

控制系统硬件部分采用模块化机器人系统(modular robotic system, MRS)设计方法<sup>[16]</sup>,该方法不仅能够提高系统容错性能,降低开发及维护成本,还能增强系统可扩展应用能力,减少机器人自身功能对于其工作环境及工作任务的限制,使机器人在其所处工作过程中展现良好的适应性、灵活性以及稳定性等优势,该机器人的控制系统整体架构如图 2 所示。



注: BD 为无刷直流电机驱动器; AS 为角度传感器; CCM 为核心控制模块; EIM 为扩展接口模块; SM 为转向电机; WM 为行走电机,下同。  
Note: BD is brushless direct current driver; AS is angle sensor; CCM is core control module; EIM is extended interface module; SM is steering motor; WM is walking motor, the same as below.

图 2 控制系统整体结构示意图

Fig.2 Overall structure schematic diagram of control system

由图 2 可以看出,控制系统的整体结构主要由 4 个大部分组成,包括中央处理器模块、终端执行器模块、上位机以及遥控器。其中:1) 系统的中央处理器模块主要负责信息的汇聚与分类发送等任务,能够实现 CAN 总线与串口之间的数据转换功能,并且能够接收遥控器发送的无线数据,对系统所需发送与接收的数据进行识别、转换与延时等处理,是整个农用轮式机器人控制系统信息交互的核心平台;2) 终端执行器模块是该控制系统的核心部分,其中每个终端执行器模块又可被分为核心控制模块(core control module, CCM)与扩展接口模块(extended interface module, EIM) 2 个部分(下文中以 CCM 和 EIM 代替),这种组成架构可使终端执行器模块的控制功能多样化,从而让机器人可以较为方便的适应多种农业环境下的不同工作状态;3) 上位机部分采用 VB 软件平台进行开发,通过串口通讯方式与中央处理器模块相互通讯,从而实现农用轮式机器人移动轮转速和转角数据的采集、显示及控制状态指令的发送等功能;4) 遥控器内部增加了一个执行模块,该执行模块具有 AD 转换功能,能够将电位器的变化量转换为数字信

号, 方便实现转速和转角的控制功能。遥控器能够通过电台与中央处理器模块进行通讯, 且能够实现对该机器人基本行走与转向等移动方式的控制, 从而方便试验与研究的过程。

### 2.1 核心控制模块

驱动控制系统中的中央处理器模块与终端执行器模块均采用 CCM 与 EIM 的结构组成方式, 其中, CCM 是由一个长 72 mm、宽 35 mm 的电路板构成, 是系统数据信号采集、控制与输出的核心组成单元, 用户只需通过更换不同的 CCM, 即可实现机器人的多种移动功能。

该机器人移动平台 CCM 采用 Microchip 公司生产的 PIC18F25K80 型号单片机作为工作主体, 选用该单片机的主要原因有 3 点: 1) 它包含了一个增强型 CAN 总线通讯模块, 支持最高 1 Mb/s 的数据传输速率, 且拥有 8 个发送或接收缓冲区寄存器; 2) 配备了 2 组增强型串行通信接口, 采用 RS232 通讯方式, 使 CCM 可以在接收遥控器电台信号的同时保持与上位机的数据传输功能; 3) 具有 4 个 PWM 输出引脚, 可实现 10 位分辨率的占空比调整功能, 从而达到控制电机转速的目的<sup>[17]</sup>。

CCM 电路板的设计主要从稳定性与安全性的角度进行考虑, 由于农用轮式机器人整体采用 48 V 电源进行供电, 而单片机的工作电压仅为 3.3 V, 因此在电路板上应用了电源转换模块(direct current- direct current, DC-DC), 在实现电压变换的同时有效的隔离了不同种电源的输出和地线, 增强了 CCM 供电系统的稳定性。另外, 还采用了双通道磁耦隔离芯片 ADUM1201/1200, 实现了 CAN 总线、PWM 输出以及其他电机控制部分与单片机实际接口之间的隔离, 且磁耦隔离方式与传统的光电耦合隔离方式相比具有数据传输速率高、瞬态共模抑制能力强以及直流校正功能等优势<sup>[18]</sup>, 图 3 为 CCM 中 CAN 总线部分和 PWM 输出部分的具体电路连接与隔离方式。

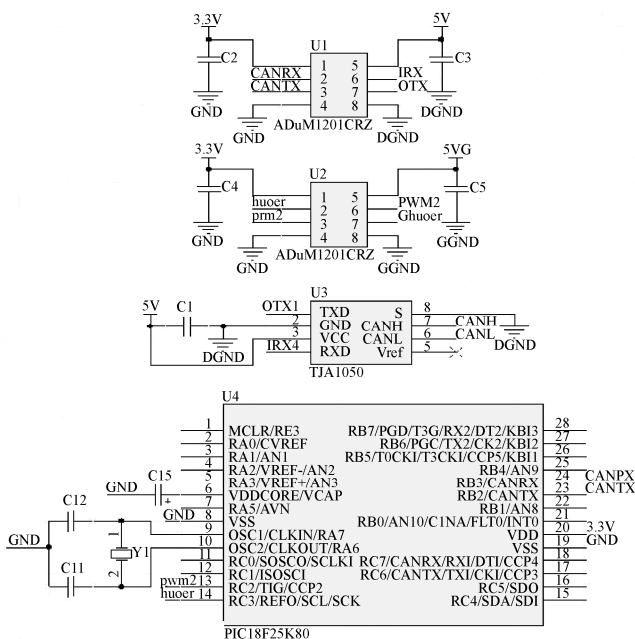


图 3 CAN 总线与脉冲调制信号隔离方案

Fig.3 CAN bus and pulse width modulation signal isolation scheme

在图 3 中, ADUM1201 隔离芯片将电路分隔为左右 2 个部分, 其中, 左半部分接口为隔离前信号, 可直接与单片机对应接口相连接, 并采用 3.3 V 电压供电从而与单片机的工作电压相匹配。右半部分接口为隔离后信号, 采用 5 V 电源供电, 将单片机与 CAN 总线以及被控电机信号隔离的同时, 还解决了 CAN 总线与单片机之间的电压匹配问题, 且提高了 PWM 信号的输出能力。CCM 的 CAN 总线部分电路还应用了 TJA1050 高速 CAN 收发器, 该收发器符合 ISO11898 国际标准, 其主要目的是为了解决物理传输媒体之间的协议转化, 实现串行数据与 CAN 总线线路之间的协议控制功能<sup>[19]</sup>。另外, CCM 电路板还特别采用了高抗电磁干扰的保护方式, 即在电路板上 ADUM1201 隔离芯片的中心位置开一个约 25 mm 长、1 mm 宽的镂空凹槽, 该凹槽的目的是为了从空间角度彻底切断被隔离两端电路的高频信号串扰, 从而更为有效的防止大部分干扰信号对单片机的工作产生影响<sup>[20]</sup>。

### 2.2 扩展接口模块

驱动控制系统中的 EIM 主要适用于中央处理器与终端执行器, 一个 EIM 可承载 2 个 CCM, 是联接 CCM 与各电机驱动器的中间设备。由于该农用轮式机器人的控制系统部分主要由 PIC18F25K80 单片机作为核心, 且电源的供应还需考虑到机械臂或传感器等外部设备扩展, 因此在机器人的机箱内部将 48 V 电源扩展至 24 V, EIM 则应用多种不同的 MORNSUN 电源转换模块, 从而实现了 24 V 电源与 12 V 和 5 V 电源之间的转换功能。EIM 除了引出 12 V 和 5 V 电源驱动外部传感器工作之外, 还引出了单片机的 2 个串口、CAN 总线接口、PWM 输出、转速信号输入以及其他电机控制功能引脚, 图 4 即为 CCM 与 EIM 的组合效果。

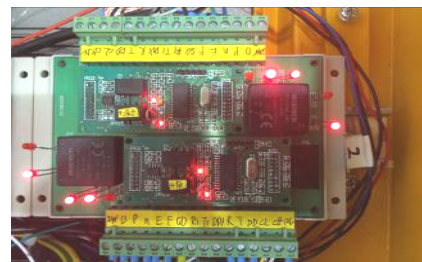


图 4 核心控制模块与扩展接口模块组合效果

Fig.4 Core control module and extended interface module combined effect

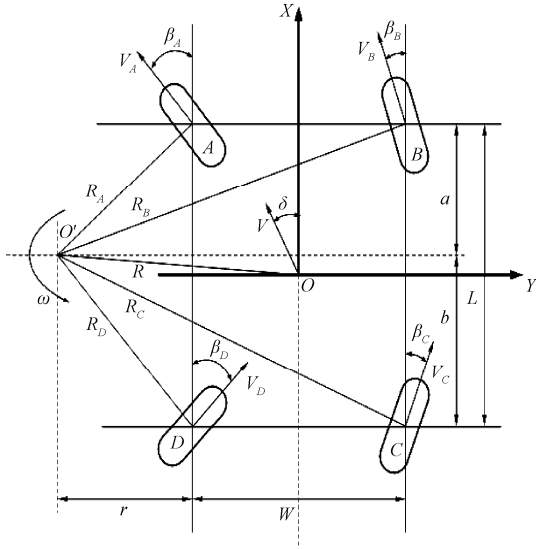
## 3 驱动控制策略

本文中的农业轮式机器人主要是采用四轮独立转向驱动的方式, 该方式与一般的差速转向和两前轮转向方式相比, 具有更高灵活度、更小的转向半径以及更强的环境适应能力, 且这种方案使机器人在面对农田复杂环境情况时具有更强的可靠性与实用性<sup>[21]</sup>。

### 3.1 四轮独立转向驱动控制原理

本文主要基于阿克曼转向原理实现了机器人的四轮独立转向功能<sup>[22]</sup>。目前, 面向四轮转向方法的研究主要有 2 种, 可分为低速转向模型与高速转向模型。当轮式

机器人处于高速行驶状态时, 其 4 个移动轮向同一侧偏转, 且前轮转向角大于后轮转向角, 并使四轮在转向过程中时刻保持同一瞬心, 这种模式能够较好的避免机器人在高速移动过程中出现较大侧偏角从而导致侧倾翻等现象的发生<sup>[23]</sup>。但由于本文中农用轮式机器人需要完成载物、喷药或采摘等任务, 高速移动模型并不适合该机器人, 因此需要采用低速模式实现该机器人的全方位四轮独立转向。低速转向模式情况下, 机器人的 2 个前轮与 2 个后轮向着相反的方向偏转, 且具有较小的转弯半径<sup>[24]</sup>, 其具体实现方式如图 5 所示。



注:  $O$  为理想状态下的质心;  $O'$  为瞬心;  $\beta_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮偏转角, ( $^\circ$ );  $R_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮绕瞬心旋转半径, m;  $V_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮绕瞬心转动线速度, m/s;  $R$  为质心转向半径, m;  $\omega$  为机器人旋转角速度, rad/s;  $r$  为左侧移动轮到瞬心的距离, m;  $a$  和  $b$  分别为瞬心延长线与移动轮前后轴之间的水平距离, m;  $W$  为左右轮距, m;  $L$  为前后轴距, m;  $\delta$  为机器人移动轮实际偏转角, ( $^\circ$ )。

Note:  $O$  refers to barycentre of ideal state;  $O'$  refers to instant center;  $\beta_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) refers to deflection angle of wheel, ( $^\circ$ );  $R_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) refers to radius rotation of wheel for instant center, m;  $V_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) refers to linear velocity of wheel for instant center, m/s;  $R$  refers to turning radius of barycentre, m;  $\omega$  refers to angular velocity of robot, rad/s;  $r$  refers to distance between left wheel and instant center, m;  $a$  and  $b$  refer to horizontal distance between extended line of instant center and front and rear axle, m;  $W$  refers to tread, m;  $L$  refers to wheelbase, m;  $\delta$  is actual deflection angle of moving wheel of robot, ( $^\circ$ ).

图 5 基于阿克曼转向原理的低速转向模型

Fig.5 Low speed steering model based on Ackerman steering principle

以左转向过程为例, 据图 5 中低速阿克曼转向几何模型可得到四轮转向角与机器人几何参数关系如式(1)。

$$\begin{cases} \beta_A = \operatorname{arccot}(r/a) \\ \beta_B = \operatorname{arccot}((r+W)/a) \\ \beta_C = \operatorname{arccot}((r+W)/b) \\ \beta_D = \operatorname{arccot}(r/b) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\beta_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮偏转角, ( $^\circ$ );  $r$  为左侧移动轮到瞬心的距离, m;  $a$  和  $b$  分别为瞬心延长线与移动轮前后轴之间的水平距离, m;  $W$  为左右轮距, m。

$$\begin{cases} a = \frac{W}{\cot \beta_B - \cot \beta_A} \\ r = \frac{W \cdot \cot \beta_A}{\cot \beta_B - \cot \beta_A} \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)中,  $W$  为已知, 即该机器人左右轮距, 通过设置移动轮的转向角, 则可以进一步计算出式(3)中机器人的实际转弯半径  $R$ 。

$$R = \sqrt{(r+W/2)^2 + (a-L/2)^2} \quad (3)$$

式中:  $R$  为质心转向半径, m;  $L$  为前后轴距, m。

此外, 根据(2)式中得到的  $a$  值, 则可以求出该机器人 2 前轮绕瞬心转动的线速度分别为:

$$\begin{cases} V_A = \omega \cdot R_A = \omega \cdot a / \sin \beta_A \\ V_B = \omega \cdot R_B = \omega \cdot a / \sin \beta_B \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $V_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮绕瞬心转动线速度, m/s;  $\omega$  为机器人旋转角速度, rad/s;  $R_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 为移动轮绕瞬心旋转半径, m。

式(4)主要计算了机器人 2 个前轮转向角与转速之间的相互关系, 而机器人左右 2 侧前后移动轮的转速大小相等。另外, 当机器人移动轮的偏转角度较小时, 会导致  $R_i$  ( $i=A,B,C,D$ ) 过大, 从而难以得到瞬心, 在这种情况下, 该机器人则会通过 2 个前轮驱动方式完成较小角度的转向任务<sup>[25]</sup>。

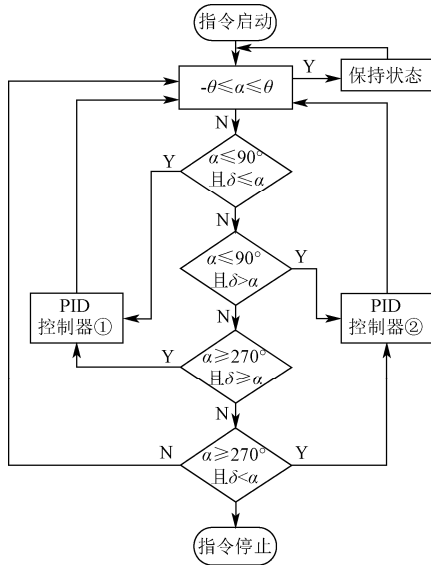
### 3.2 农用轮式机器人四轮协同控制算法

本文中农业轮式机器人的控制核心为 PIC18F25K80 单片机, 底层软件主要采用 PID 控制方法确定移动轮转向角与转速的变化量, 而上位机软件则根据上述阿克曼四轮独立转向原理对用户输入的移动轮转角进行解算, 为保证实时控制效果对控制算法进行了简化, 解算过程中令该机器人同侧前后移动轮转角大小相等且方向相反, 使瞬心延长线与移动轮前后轴之间的水平距离为轴距的一半, 因此只需输入任意一个移动轮所需的转角<sup>[26]</sup>, 上位机即可同时确定该机器人 4 个移动轮所对应的转向角与转速, 并将结果通过串口发送给中央处理器模块, 从而实现四轮独立驱动控制算法针对转向角与转速的协同分配, 并为底层 PID 控制提供有效的输入。

该机器人转向控制的实现主要由底层软件完成, 其中, 被控对象为转向电机, 单片机通过 PID 控制算法调整其相应引脚的 PWM 输出量以及高、电平变化从而实现对移动轮转向角度的精确控制<sup>[27]</sup>, 其具体控制算法流程如图 6 所示。

在图 6 中,  $\alpha$  为用户通过上位机设置的机器人移动轮设定偏转角;  $\delta$  则为该机器人的移动轮实际偏转角。为了保证在较高控制精度的同时也能满足控制稳定性的需求, 防止机器人移动轮产生不断抖动的现象, 因此在控制算法中加入了保护区  $\theta$ 。虽然该机器人可以实现  $0 \sim 360^\circ$  的独立旋转功能, 但在控制过程中只判断  $\alpha$  与  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  之间的大小关系, 其目的是为了使机器人移动轮能够被控制在  $90^\circ \sim 270^\circ$  范围内移动, 这种控制方法能够更加清晰明确的表达移动轮当下所处的位置, 也能够适应遥控器的操作方式。当控制系统处于  $\alpha$  小于等于  $90^\circ$  且  $\delta$  大于  $\alpha$  和  $\alpha$  大于等于  $270^\circ$  且  $\delta$  小于  $\alpha$  这 2 种状态下时, 其所需控制算法与另外 2 种状态有所区别, 因此采用了 2 种不同的 PID 控制器来实现移动轮的独立转向功能。其中, PID 控制器②与 PID 控制器①相比主要增加了移动

轮所处位置的判断功能，若当移动轮处于  $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$  时，则顺时针转动，当移动轮处于  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  时，则逆时针转动，这种方式能够使移动轮时刻以最小旋转角度完成实际转向任务。



注： $\alpha$  为机器人移动轮设定偏转角， $(^{\circ})$ ； $\theta$  为保护区， $(^{\circ})$ 。  
Note:  $\alpha$  is setting deflection angle of moving wheel of robot,  $(^{\circ})$ ;  $\theta$  is protection area,  $(^{\circ})$ .

图 6 底层控制算法流程图  
Fig.6 Flow chart of bottom control algorithm

底层软件中有关 PID 控制器的 3 个参数主要根据经验以及多次试验调整进行整定，整定方法遵循先比例后积分最后微分的原则<sup>[28]</sup>，首先单独调整比例系数  $P$ ，使移动轮摆动 1 次左右达到稳态，此时出现稳态误差则加入积分控制，为保证控制的时效性积分时间常数不宜太大，随后加入微分控制，由于控制系统没有明显的滞后现象，因此设定较小的微分时间常数保证一定的超调量，最后对控制系统整体进行微调，确定比例系数  $P=3$ ，积分时间常数  $Ti=1.25\text{ ms}$ ，微分时间常数  $Td=0.3\text{ ms}$ ，使移动轮震荡 2 到 3 次左右即可达到稳态，并具有较高的转角控制精度。

## 4 试验及结果分析

### 4.1 农用轮式机器人转角控制试验

为了更好的实现该农用轮式机器人的四轮独立转向驱动控制功能，对其移动轮转角控制精度进行了试验，将机器人放置于平坦路面上，用户经上位机给出设定角度值，并记录下实际的反馈控制数据，如表 1 所示。

该机器人移动轮的转角控制精度试验数据是通过多次测量取平均值的方式计算得出的，其中，每组数据分别进行 10 次重复设定，实际角度值则由角度传感器实时测量得到，每次给定角度后均会得到一个对应的实际角度值。从表 1 可以看出，在  $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$  旋转过程中，该机器人移动轮转角控制的最大平均绝对误差为  $0.10^{\circ}$ ，且对应标准差最大不超过  $0.03^{\circ}$ ，这说明每次控制得到的结果都较为稳定，没有产生较大波动的情况，因此该机器人移

动轮的转角控制具有较高精度。

表 1 转角控制试验结果

设定角度 Angle setting/ $(^{\circ})$	平均实际角度 Average practical angle/ $(^{\circ})$	平均绝对误差 Mean absolute error/ $(^{\circ})$	标准差 $\sigma$ Standard deviation $\sigma/(^{\circ})$
0	0.06	0.06	0.02
0.20	0.28	0.08	0.01
20.50	20.48	0.02	0.02
84.80	84.73	0.07	0.01
90	90.10	0.10	0.01
300.60	300.67	0.07	0.03
355	355.07	0.07	0.02

### 4.2 农用轮式机器人转速控制试验

由于本文中农用轮式机器人的开发理念是为了使机器人能够更好的完成采摘或喷药等实际农田作业任务，因此采用了低速模式下的阿克曼四轮转向模型，即该机器人能够实现  $0\sim 3.6\text{ km/h}$  速度内的精确控制功能。本文对其移动轮行走电机进行了转速控制试验，其中，共记录了 60 组试验数据，试验结果表明，各组数据之间差异性并不明显，因此选取了 2 组差异相对较大的试验数据进行分析，得到其转速控制过程响应曲线如图 7 所示。

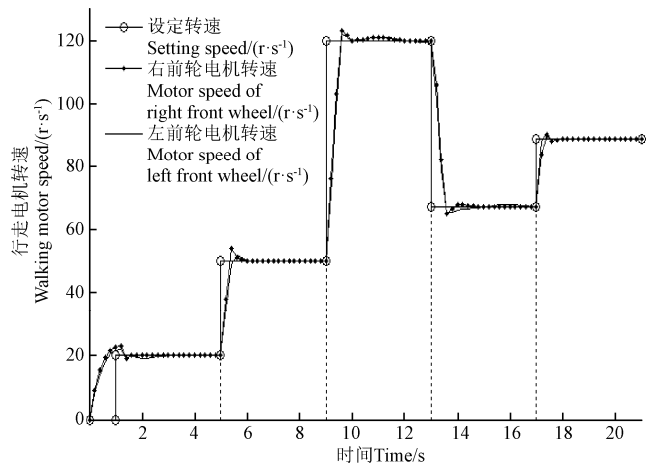


图 7 行走电机转速控制过程响应曲线  
Fig.7 Response curve of walking motor speed control process

试验过程中，在 1、5、9、13 和 17 s 时刻分别设定移动轮的转速为 20、50、120、67 和 89 r/s，即曲线的拐点位置。可以看出，在起始时刻，电机已经开始工作，这是由于驱动控制系统加入了启动算法，避免机器人因启动速度过快而产生一些危险情况。此外，根据所设定转速与实际转速差值大小的不同，在转速设定完成后  $0.5\sim 1\text{ s}$  左右，2 个行走电机可基本进入稳定控制状态，且能够达到所要求的旋转速度。左前轮响应时间与右前轮相比具有微小差别，主要是因为 CAN 总线采用分时复用的应答通讯方式，该方式能够避免大量数据传输导致数据包丢失等情况的发生，并同时使通讯对象更加清晰明确。试验表明，该机器人具有较高的转速控制精度和良好的移动轮转速控制效果。



### 4.3 驱动控制系统可靠性试验

本文中农用轮式机器人的驱动控制系统整体硬件部分主要采用自主研发方式,结合模块化集成办法,实现了该农用机器人的四轮独立转向驱动控制功能。因此,本文针对该机器人驱动控制系统的可靠性进行了一系列试验,并较为全面的检测了其实际驱动控制能力<sup>[29]</sup>。

1) 对该机器人驱动控制系统进行耐久性试验,通过上位机软件重复验证其移动轮转速、转角、使能以及反转等各项功能,试验累计时长约为 30 h,且过程中每间隔 2 min 进行一次测试。这种方式不仅能够检测电机驱动控制方法的鲁棒性,也能够充分体现控制系统中 CAN 总线、串口信号通讯以及系统硬件整体工作情况的稳定性。在整个试验过程中和试验结束后,该机器人驱动控制系统均未发生故障,说明本文中农用轮式机器人驱动控制系统具有较高的工作稳定性和可重复性。

2) 由于农用轮式机器人需要适应农田中较为复杂的环境因素,且有可能出现电流过大或温度过高等情况的发生,因此进行了移动轮堵转试验以及电路过流保护效果测试<sup>[30]</sup>。将该机器人移动轮电机转速从 50 r/s 堵转至 0 时,其驱动控制电路未发生故障,驱动器自动关闭电机使能引脚并进入保护状态。经试验得到,本文中农用轮式机器人驱动控制系统具有较好的容错性能以及较强的环境适应能力。

## 5 结论与展望

1) 根据农用轮式机器人转向平台多元化、环境适应能力智能化以及驱动控制系统模块化等要求,采用模块化设计方法设计了四轮独立转向驱动控制系统的硬件部分,基于低速阿克曼四轮转向模型以及 PID 控制算法设计了该机器人的驱动控制系统,通过主、从单片机的 CAN 总线与串口数据传输等功能,完成了上位机以及系统底层模块之间的相互通讯,并通过计算分析验证了四轮独立转向驱动控制策略的有效性。

2) 对该机器人的驱动控制系统进行了控制效果试验,试验结果表明:在 0~360°过程中,该机器人移动轮转角控制的最大平均绝对误差为 0.10°,且控制效果稳定,通过上位机设定转速后经 0.5~1 s 左右,移动轮转速达到稳态,并具有较高转速控制精度,该农用轮式机器人驱动控制系统能够较好的适应环境因素变化,且具有较高可靠性以及容错能力。

在本文研究基础上,下一步将结合 GNSS 以及机器视觉等导航方式并采用模糊控制等智能控制算法提高农用轮式机器人的智能化与自动化水平,从而更好的为农业生产提供服务。

### [参 考 文 献]

- [1] 陈威,郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 196—205.  
Chen Wei, Guo Shupu. Current situation and existing problems of agricultural informatization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2013, 29(22): 196—205. (in Chinese with English abstract)
- [2] 米秀杰. 单片机应用系统研究—轮式移动机器人控制系统设计与研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(2): 63—66.  
Mi Xiujie. An applied research on SCM system: An research on control system on WMR[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(2): 63—66. (in Chinese with English abstract)
- [3] Min H K, Beom S R, Kyoung C K, et al. Autonomous greenhouse mobile robot driving strategies from system integration perspective: Review and application[C]// Transactions on Mechatronics. America: IEEE/ASME, 2014: 1—12.
- [4] Giovana T T, Eduardo P G, Rubens A T, et al. Hydraulic networked control of four wheel steering agricultural robot[C]//International Conference on Control and Automation. America: IEEE, 2011: 142—147.
- [5] 张铁民, 黄翰, 黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 11—18.  
Zhang Tiemin, Huang Han, Huang Penghuan. Design and test of drive and control system for electric wheeled mobile car[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(19): 11—18. (in Chinese with English abstract)
- [6] Shuai Zhibin, Zhang Hui, Wang Junmin, et al. Lateral motion control for four-wheel-independent-drive electric vehicles using optimal torque allocation and dynamic message priority scheduling[J]. Control Engineering Practice, 2014, 3(1): 55—66.
- [7] Mao Xu, Wang Xina, Zhang Junchao, et al. Design of electric orchard vehicle four-wheel steering control system[J]. Advanced Materials Research, 2013, 51(2): 1966—1969.
- [8] 张小江, 高秀华, 王云超. 车辆转向统一动力学模型及模型跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 173—177.  
Zhang Xiaojang, Gao Xiuhua, Wang Yunchao. Unified dynamical model of vehicle steering and model-following control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 173—177. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张传斌, 余泳昌, 吴亚萍, 等. 高通过性四轮自走式烟草田间作业机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 37—41.  
Zhang Chuanbin, Yu Yongchang, Wu Yaping, et al. Design of high trafficability four wheel self-propelled field machine for tobacco[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [10] 毛罕平, 倪静, 韩绿化, 等. 高地隙液压四轮驱动喷雾机转向防滑控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 58—62.  
Mao Hanping, Ni Jing, Han Lühua, et al. Turning anti-slip control system of hydraulic four-wheel drive high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 58—62. (in Chinese with English abstract)
- [11] Sang E S, Nathan C, Junichi T, et al. Preliminary evaluation of a MRI-compatible modular robotic system for MRI-guided prostate interventions[C]//International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. America: IEEE RAS & EMBS, 2010: 796—801.

- [12] 王建彬, 杨宜民, 陈建平. 改进 BELVC 的四轮驱动机器人运动控制方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 9—12.  
Wang Jianbin, Yang Yimin, Chen Jianping. Motion control of four-wheel omni-directional mobile robots by improved brain emotional learning velocity controller[J]. Huazhong University of Sci & Tech : Natural Science Edition, 2013, 41(1): 9—12. (in Chinese with English abstract)
- [13] Yang Hao, Vincent C, Jiang Bin. Optimal fault-tolerant path-tracking control for 4WS4WD electric vehicles[C]//Transactions on Intelligent Transportation Systems. America: IEEE, 2010: 237—243.
- [14] Tin Lili, Qian Huihuan, Xu Yangsheng. Omnidirectional steering interface and control for a four-wheel independent steering vehicle[C]//Transactions on Mechatronics. America: IEEE/ASME, 2010: 329—338.
- [15] 王静, 张倩, 朱晓言, 等. 基于 CAN 总线的联合收割机脱粒滚筒测控系统研究[J]. 农机化研究, 2012, 5(1): 71—75.  
Wang Jing, Zhang Qian, Zhu Xiaoyan, et al. Control system of combine harvester threshing cylinder based on CAN bus[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 5(1): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhao Jie, Cui Xindan, Zhu Yanhe, et al. A new reconfigurable modular robotic system with multimode locomotion ability[J]. International Journal, 2012, 4(2): 178—190.
- [17] 王江波, 杨仁刚, 高春风. 基于 CAN 总线的供电系统三相并联逆变器同步控制方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 179—186.  
Wang Jiangbo, Yang Rengang, Gao Chunfeng. Three-phase parallel inverter synchronous control method based on CAN bus in power supply system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 179—186. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王春燕, 崔滔文, 赵万忠, 等. 基于理想传动比的主动前轮转向控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 85—90.  
Wang Chunyan, Cui Taowen, Zhao Wanzhong, et al. Active front wheel steering control based on ideal transmission ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 85—90. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张小龙, 李亮, 曹成茂, 等. 基于 CAN 的汽车低附路面稳定性控制测试系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 7—12.  
Zhang Xiaolong, Li Liang, Cao Chengmao, et al. Vehicle stability control test system applied on low friction road based on CAN technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [20] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 四轮驱动电动汽车永磁无刷轮毂电机转矩分配[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(4): 451—456.  
Lu Dongbin, OuYang Minggao, Gu Jing, et al. Torque distribution algorithm for a permanent brushless DC hub motor for four-wheel drive electric vehicles[J]. Journal Tsinghua University : Sci & Tech, 2012, 52(4): 451—456. (in Chinese with English abstract)
- [21] Sharbafi M A, Lucas C, Daneshvar R. Motion control of omni-directional three-wheelrobots by braine-motional-learning-based intelligent controller[C]//Transactions on Systems, Man and Cybernetics, C: Applications and Reviews. America: IEEE, 2010: 630—638.
- [22] 曾锦锋, 陈晨, 杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 13—19.  
Zeng Jinfeng, Chen Chen, Yang Meng'ai. Design of four-wheel steering mechanism based on ackerman steering principle[J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 13—19. (in Chinese with English abstract)
- [23] Gonzalez R, Fiacchini M, Alamo T, et al. Adaptive control for a mobile robot under slip conditions using an LMI-based approach[C]//European Control Conference. Budapest: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009: 23—26.
- [24] Tabbache B, Kheloui A, Benbouzid M E H. An adaptive electric differential for electric vehicles motion stabilization[J]. Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 104—110.
- [25] Chatzikomis C I, Spentzas K N. Comparison of a vehicle equipped with electronic stability control (ESC) to a vehicle with four wheel steering (4WS)[J]. Forschung in Ingenieurwesen/Engineering Research, 2014, 78(1): 391—399.
- [26] 王友权, 周俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 110—113.  
Wang Youquan, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 110—113. (in Chinese with English abstract)
- [27] Sharp R S, Peng H. Vehicle dynamics applications of optimal control theory[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7): 1073—1111.
- [28] Weiskircher T, Müller S. Control performance of a road vehicle with four independent single-wheel electric motors and steer-by-wire system[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1): 53—69.
- [29] 陈超, 汤玲迪, 顾哲, 等. 基于单片机控制的变域喷洒喷头水力性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 116—122.  
Chen Chao, Tang Lingdi, Gu Zhe, et al. Hydraulic performance experiment of variable wetting sprinkler based on single-chip microcomputer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 116—122. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王增才, 刘春辉, 张长冲, 等. 车辆电子稳定系统的最优控制与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2767—2769.  
Wang Zengcai, Liu Chunhui, Zhang Changchong, et al. Optimal control and simulation of vehicle electronic stability program[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(9): 2767—2769. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot

Zhang Jing<sup>1</sup>, Chen Du<sup>1\*</sup>, Wang Shumao<sup>1</sup>, Hu Xiaoan<sup>2</sup>, Wang Dong<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of agricultural wheeled robots such as single steering mode, being difficult to adapt to the complex operating environment in field, higher cost for promotion and application, this paper designed a four-wheel independent steering driving and control system for the agricultural wheeled robot. The mechanical body of agricultural wheeled robot was composed of 3 parts, which mainly included robot walking chassis, power supply system, and electrical and computer control system. The robot walking chassis adopted the structure with high ground clearance which not only ensured the farmland operation, but also optimized the function of four-wheel independent steering driving and control system. Furthermore, the agricultural wheeled robot was also equipped with a battery, BLDC (brushless direct current) driver, angle sensor and other external devices. Besides, the hardware of the control system was constructed by using the modular design method and it could be divided into 4 parts which contained central processing module, terminal actuator module, upper computer and remote controller. Among them, the central processor module was the core platform of information exchange in the whole control system. The terminal actuator module could complete the control tasks of BLDC motor and send data to the central processor module at the same time. The control system selected the PIC18F25K80 microcontroller as master chip, applied the excellent hardware circuit isolation scheme and combined with the CAN (controller area network) bus, the serial communication and the technology of sensor, which techniques assisted the control system to realize the function of data acquisition and transmission for the speed and angle for the robot wheels. In addition, by analyzing the low-speed Ackerman four-wheel steering model and the PID (proportion, integration, differentiation) control algorithm, this paper verified the effectiveness and practicability of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot. The experiment results showed that: through the upper computer and the remote controller, this robot could achieve the control function of four-wheel independent steering and speed. In the process of 0-360° steering, there was strong robustness and stability for the effect of wheel control. The maximum mean absolute error of the steering control was 0.10°, and the corresponding maximum standard deviation was less than 0.03°. It meant that the result of each control was relatively stable and there were no cases with major fluctuation. The speed control process of walking motor for the left front wheel and the right front wheel was analyzed. Both of the walking motors could basically get into stable control state and reach the required speed about 0.5-1 s after accomplishing speed setting. It proved that the speed control precision of walking motor achieved the design goal and had a quick response. This paper also carried out the 30 h durability test which consisted of the rotor locking test of wheel and the over current protection test for this driving and control system. The four-wheel independent steering driving and control system with reliable and flexible function can adapt to the changes of complex environment factors, meet the actual needs of farmland operation and have better services for agricultural production.

**Key words:** mechanization; robots; control systems; four-wheel steering; modular design