

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.001

饲草推送机器人磁条导航自动充电研究

万畅^{1,2} 谭彧¹ 郑永军¹ 文伟松¹ 杨圣慧¹ 李宝胜¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 为了实现牛场勤密饲喂, 饲草推送机器人自动充电系统采用上置对接式, 由充电桩、机器人充电控制部分组成。充电桩包含蓄电池充电器、充电电路和充电电极等; 机器人充电控制部分包含控制器、行走驱动模块、电源监控模块、传感数据采集模块、继电器和充电电极等。在充电对接部位建立坐标系 XYZ, 根据电极长度、电极压缩行程、电极宽度, 确定 X、Y、Z 轴的对接容错范围。根据半开放式牛场工作环境, 在自动充电区域设置充电桩、磁条导航路径。饲草推送机器人在磁条导航过程中, 通过磁导航传感器实时检测磁信号, 获得磁导航偏差, 采用模糊 PID 控制算法, 得到左右轮速度控制量后, 转换成对应电动机角速度值, 控制器输出对应占空比的 PWM 信号控制电动机转速。结合磁导航传感器特性和试验, 获得模糊控制器的输出参数调整规则。自动充电磁条导航试验结果表明: 当磁导航偏差绝对值 $|e|$ 为最大值时, 比例系数调整值 ΔK_p 最大值为 1.28, 最小值为 1.03; 积分系数调整值 ΔK_i 最大值为 0.13, 最小值为 0.06; 微分系数调整值 ΔK_d 最大值为 -1.18, 最小值为 -1.5; 通过模糊 PID 控制, PID 控制器系数可进行自适应修正; X 轴、Y 轴和 Z 轴最大对接偏差绝对值分别是 4.1、1.9、0.7 cm, 对接偏差均在容错范围之内。

关键词: 饲草推送; 机器人; 磁条导航; 自动充电; 模糊控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0001-07

Automatic Charging of Forage Pushing Robot by Magnetic Stripe Navigation

WAN Chang^{1,2} TAN Yu¹ ZHENG Yongjun¹ WEN Weisong¹ YANG Shenghui¹ LI Baosheng¹

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

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: In order to realize frequent feeding in cattle farm, automatic charging system of forage push robot adopted upper docking type, and it included charging pile and charging control part of the robot. The charging pile included battery charger, charging circuit and charging electrode. The charging control part of robot included controller, walking driving module, power monitoring module, sensor data acquisition module, relay and charging electrode. A coordinate system XYZ was set up at the charging junction. According to electrode length, electrode compression stroke and electrode width, the fault tolerance range of X, Y and Z axes was determined. According to the working environment of semi-open cattle farm, charging piles and magnetic stripe navigation charging path were set up in automatic charging area. During the navigation of forage pushing robot, magnetic navigation sensor detected magnetic signal, and magnetic navigation deviation was obtained by data processing. A fuzzy PID control was adopted. When the control speeds of the left and right wheels of the forage pushing robot was obtained, the speed value of each wheel was converted to angular velocity value of according motor. The controller outputted PWM signal of corresponding duty ratio to control the rotation speed of motor. Combining with the characteristic and experiment of magnetic navigation sensor, the adjustment rules of output parameters of fuzzy controller was obtained. The results of charging and docking tests by magnetic strip navigation were as follow. When the absolute value $|e|$ of magnetic navigation deviation was the maximum, the maximum value of proportional coefficient adjustment value ΔK_p was 1.28, and the minimum value was 1.03. The maximum value of the integral coefficient adjustment value ΔK_i was 0.13, and the minimum value was

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B10-0102)和新疆生产建设兵团科技局项目(2016AB003)

作者简介: 万畅(1979—), 男, 博士生, 塔里木大学副教授, 主要从事机电一体化研究, E-mail: 437060056@163.com

通信作者: 谭彧(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事机电一体化研究, E-mail: tanyu@cau.edu.cn

0.06. The maximum value of differential coefficient adjustment value ΔK_d was -1.18 , and the minimum value was -1.5 . PID controller coefficient can be adaptively corrected by the fuzzy PID control. The maximum docking deviations of magnetic navigation on X axis, Y axis and Z axis were 4.1 cm, 1.9 cm and 0.7 cm, respectively, and the docking deviations were within the fault tolerance range.

Key words: forage pushing; robot; magnetic stripe navigation; automatic charging; fuzzy control

0 引言

当前,机器人主要采用蓄电池供电,自动充电是一项关键技术^[1-4]。机器人实现自动充电的关键是要求机器人与充电桩之间的准确对接,机器人需要准确识别充电桩位置与自定位^[5]。针对不同工作环境和领域的机器人,国内外学者研究了适应特定环境的机器人自动充电方法,并取得了一系列成果。在充电桩和电极识别方面,机器人可通过摄像头识别三维标识并寻找充电桩^[1];无人驾驶小车通过激光传感器扫描测距,并识别具有特征形状的充电桩^[2];基于多传感器信息融合的安保机器人可以自动寻找充电桩并进行充电^[3];安装在机器人本体的激光雷达传感器通过扫描测距搜索充电电极位置^[4]。在机器人与充电桩准确对接方面,自动充电系统结合摩擦力与磁场力,引导机器人与充电桩对接,并实现误差补偿^[6];充电对接控制策略^[7]、充电装置和定位算法^[8]也是研究的热点。在电源监控方面,自动充电机器人监测系统具有自诊断功能,能够主动并实时监测机器人电源^[9]。

在牛场奶牛养殖中,实施自动化饲喂是提高奶牛产量、降低生产成本的重要途径^[10-14]。围绕奶牛精细饲喂装备,国内学者在机械结构设计^[11]、饲喂控制系统^[12-14]、饲草推送装置^[15-16]、饲草推送器自动安全充电系统^[17]等方面开展了研究。本文设计饲草推送机器人磁条导航充电系统,采用模糊比例-积分-微分(Proportional-integral-differential, PID)控制方法,实现自动充电导航。

1 饲草推送机器人工作原理

1.1 工作环境

饲草推送机器人工作环境如图1所示,整个工作区域分为自主运行和自动充电,自主运行部分完成饲草推送作业,自动充电部分完成机器人自动安全充电,这两部分构成饲草推送机器人连续的工作环境。牛场中间为走廊,两边为牛栏,靠近牛栏走廊堆放饲草,饲草推送机器人将饲草推送到饲喂区,供奶牛食用。饲喂区是奶牛将头伸出牛栏吃饲料的区域,饲草推送机器人不能进入该区域,以免碰撞奶牛。饲草推送机器人按照设定的时间间隔、相对牛栏的推送宽度和工作路径行走,将饲草推送到饲喂

区,保持牛栏旁的饲喂区内始终有足够的饲草。当电量低于阈值时,机器人进入自动充电区域自动充电。

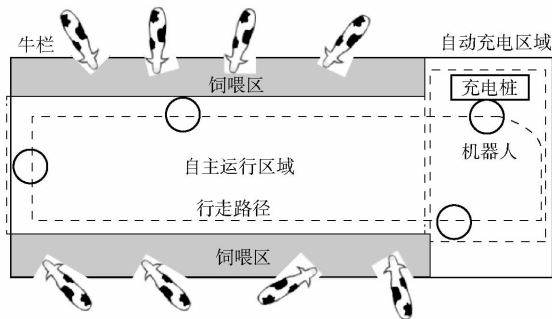


图1 工作环境示意图

Fig.1 Diagram of working environment

如图2所示,该牛场环境属于半开放式,即饲草推送机器人行走区域部分在室外,部分在室内,其中自动充电区域在室外,对自动充电系统稳定性、可靠性要求较高。



图2 牛场环境

Fig.2 Environment of cattle farm

1.2 总体结构

饲草推送机器人由机械部分和控制部分组成,如图3所示,机械部分主要由行走底盘、自旋转饲草推送装置、上盖等组成。底盘采用三轮行走机构,实现驱动行走和灵活转向,同时起到支撑作用;其中2个驱动轮差速转向,由无刷电动机驱动,后面1个从动轮为万向轮。以三轮底盘结构为基础,构建机器人支撑机构和旋转推送机构。机器人在行进过程中,通过自旋转饲草推送装置将饲草推入饲喂区,该装置主要由一对外啮合齿轮、推送支撑机构、电动机和旋转推送机构组成。旋转推送机构由回转轴承、辐条和圆筒旋转外壳组成,辐条与回转轴承通过螺栓进行连接,直流电动机经减速后驱动回转从动齿轮,带动辐条转动,从而驱动圆筒旋转外壳转动,将饲草推送至饲喂区内,完成推送功能。

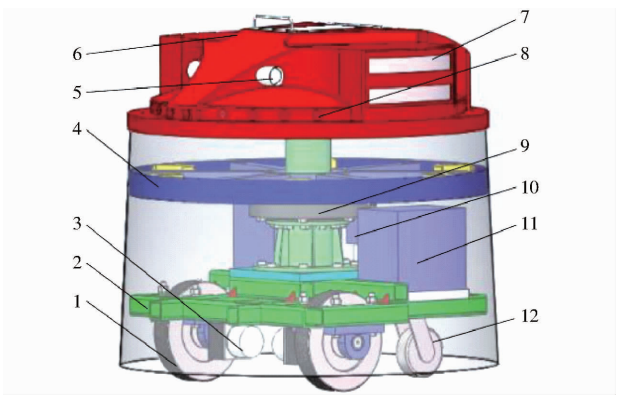


图3 饲草推送机器人结构简图

Fig.3 Structure diagram of forage pushing robot

1. 驱动轮 2. 机架 3. 行走驱动电动机 4. 自旋转饲草推送装置 5. 测距传感器 6. 上盖(内含控制箱) 7. 充电电极 8. 避障传感器 9. 从动齿轮 10. 旋转驱动电动机及主动齿轮 11. 蓄电池 12. 从动轮

如图4所示,主控制器对饲草推送机器人进行管理和控制。从控制器是控制系统的数据采集单元和运动控制单元。测距传感器、陀螺仪传感器和编码器等传感器用于机器人的定位。其中,陀螺仪和编码器是内传感器,陀螺仪用于确定机器人的航向,编码器用于采集机器人的速度和测量机器人的行走距离。测距传感器和避障传感器均为超声波传感器。测距传感器用于测量机器人与牛栏之间的距离。避障传感器用于规避障碍物。磁导航传感器用于跟踪充电区域的导航磁条,实现机器人与充电桩的对接。电流传感器和电压传感器用来检测饲草推送机器人的电流和电池电压。

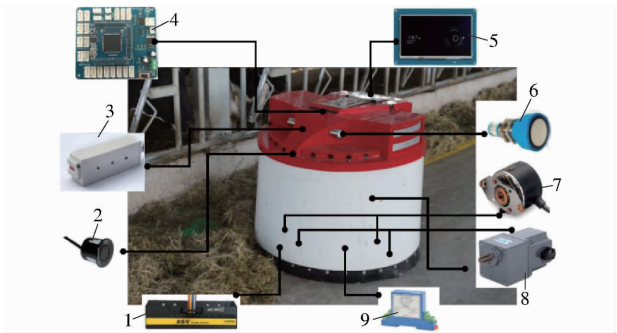


图4 饲草推送机器人控制部分

Fig.4 Control part of forage pushing robot

1. 磁导航传感器 2. 避障传感器 3. 陀螺仪 4. 从控制器 5. 主控制器 6. 测距传感器 7. 编码器 8. 无刷电动机 9. 电流电压传感器

1.3 控制系统原理

如图5所示,控制系统硬件包含主控制器(型号 OK335XD)和从控制器(型号 MC9S12XS128)。主控制器是精简指令集处理器(Advanced risc machine, ARM),通过控制器局域网络(Controllor area network,CAN)总线与从控制器连接。从控制

器定时采集传感器的数值,同时进行机器人位姿的计算,并将数据上传给主控制器,从而使主控制器获知传感器数据和机器人的位姿信息。主控制器根据控制要求,向从控制器发送对机器人的控制指令。从控制器根据控制指令,输出脉冲宽度调制(Pulse width modulation,PWM)控制左右轮电动机的速度,从而控制机器人的运动。

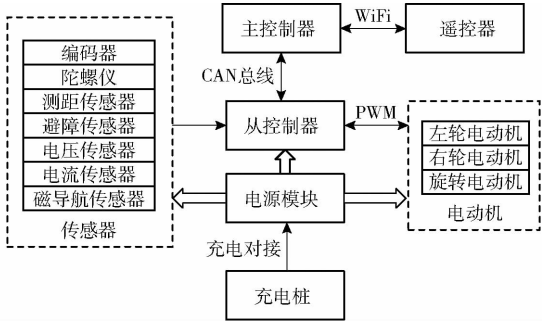


图5 饲草推送机器人控制系统硬件框图

Fig.5 Control system hardware block diagram of forage pushing robot

2 自动充电系统总体设计方案

2.1 工作原理

如图6所示,自动充电系统包括充电桩、机器人充电控制部分。充电桩包含蓄电池充电器、充电电路和充电电极等。机器人充电控制部分包含从控制器、行走驱动模块、电源监控模块(ARM 终端)、传感数据采集模块和继电器等部分。电源监控模块与从控制器通信,接收来自从控制器的电源工作参数,并将参数显示到电源监控模块界面。磁导航传感器实现磁导航信号采集,机器人导航过程中,通过磁导航传感器实时检测磁信号,经数据处理获得磁导航偏差,从控制器通过 PWM 分别控制左、右行走电动机转速,完成行走方向调整。

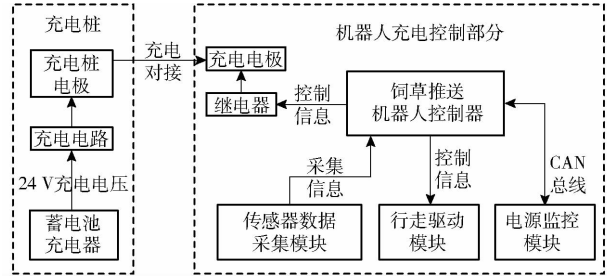


图6 自动充电系统工作原理

Fig.6 Working principle of automatic charging system

2.2 对接容错范围

图7中,左侧为充电桩,右侧为饲草推送机器人,自动充电系统采用上置电极对接方式,饲草推送机器人的充电接触片与充电桩的电极弹簧片相互挤压实现电气导通。在对接电极部位建立坐标系

XOY , 其中 X 轴为机器人前进方向, Y 轴水平垂直于机器人前进方向, Z 轴垂直于地面。此时, 电极长度沿 X 轴方向, 压缩行程沿 Y 轴方向, 电极宽度沿 Z 轴方向。饲草推送机器人自动充电系统在对接时, 具备 X 轴对接容错范围 F_x 、 Y 轴对接容错范围 F_y 和 Z 轴对接容错范围 F_z 。根据电极长度、电极压缩行程、电极宽度, 可以获得其值分别为 $F_x \in (-34.35 \text{ cm}, 34.35 \text{ cm})$ 、 $F_y \in (-3 \text{ cm}, 3 \text{ cm})$ 、 $F_z \in (-2 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ 。

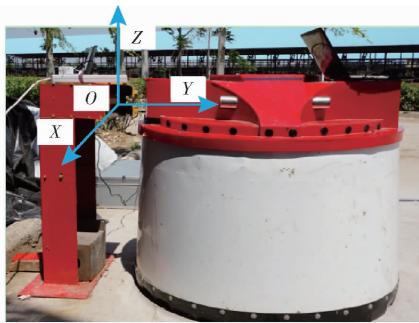


图7 自动充电系统结构

Fig. 7 Structure of automatic charging system

2.3 软件设计

如图8所示, 主程序模块的流程为: 首先进行系统初始化, 然后进行传感器信息采集、充电导航控制、电源工作参数传输和充电对接检测, 最后进行充电监控。充电导航控制时, 实时采集饲草推送机器人充电电极两端电压并判断是否对接成功, 同时将电源充电参数上传到 ARM 终端, 若对接成功, 则停止运动并进行充电, 否则继续进行导航控制。充电时, 实时监控充电电流, 当电源充满后, 断开充电电路, 充电结束。

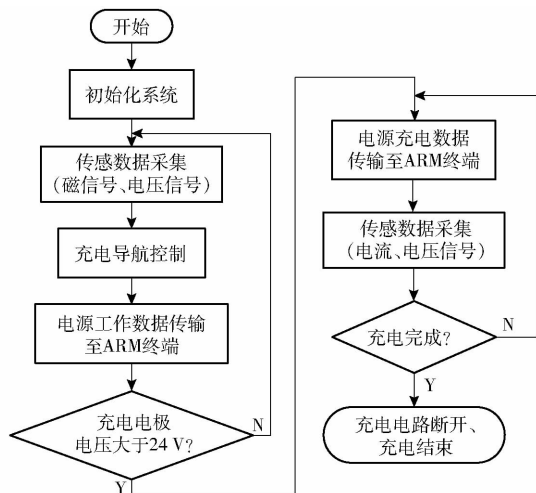


图8 自动充电系统主程序流程图

Fig. 8 Main program flow chart of automatic charging system

2.4 自动充电导航路径

如图9所示, 饲草推送系统路径分为饲草推送

路径和充电导航路径, 虚线框内自动充电区域, 虚线框外为饲草推送区域, 以充电桩所在位置0点作为饲草推送系统工作起点, 同时也是工作终点。充电导航路径是在自动充电区域内铺设的一条磁条路径, 即 $4 \rightarrow 5 \rightarrow 0 \rightarrow 1$, 在蓄电池电量不足时, 通过磁条导航进入自动充电区域后, 通过磁导航引导至位置0, 即充电位置, 结合传感器与继电器实现对接充电, 并等待下一次工作。饲草推送路径即 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$, 通过遥控器或主控制器设置饲草推送系统工作参数完成, 包括工作时间、行走距离和推送宽度, 切换到自动模式后饲草推送系统即可按照设定路径自动巡径工作。

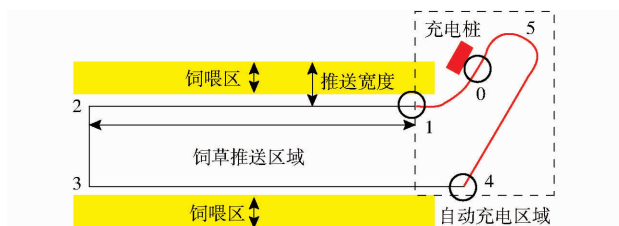


图9 自动充电导航路径

Fig. 9 Automatic charging navigation path

3 自动充电磁条导航模糊控制方法

3.1 模糊 PID 控制系统模型

离散 PID 控制器的位置型控制方程为

$$v(n) = v_0 + K_p e(n) + K_i \sum_{i=1}^n e(i) + K_d (e(n) - e(n-1)) \quad (1)$$

式中 $v(n)$ ——第 n 次采样时刻点驱动轮速度, m/s

v_0 ——驱动轮的初始速度, m/s

K_p ——比例系数

$e(n)$ 、 $e(n-1)$ ——第 n 、 $n-1$ 次采样时刻点的磁导航偏差, m

K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

PID 控制器以磁导航偏差 $e(n)$ 作为输入, 以饲草推送机器人驱动轮轮速 $v(n)$ 为输出。饲草推送机器人具有强的非线性, 难以确定其精确的数学模型。常规 PID 控制器 3 个系数固定, 当磁导航偏差值大时, 可能出现较大的振荡或响应速度太慢, 导致导航失败。因此, 本文采用模糊控制技术实现 PID 控制器系数的实时调整。

如图10所示, 磁导航控制系统输入为预期磁导航路径, 输出为饲草推送机器人实际磁导航路径, 磁导航传感器检测实际磁导航路径, 由此构成一个完整的反馈系统。模糊控制器可实现 PID 控制器 3 个参数的实时调整^[17-19]。模糊控制器以磁导航偏差

e 、磁导航偏差变化率 e_c 作为输入,模糊控制器输出为 PID 参数调整量,即:比例系数调整值 ΔK_p 、积分系数调整值 ΔK_i 和微分系数调整值 ΔK_d 。

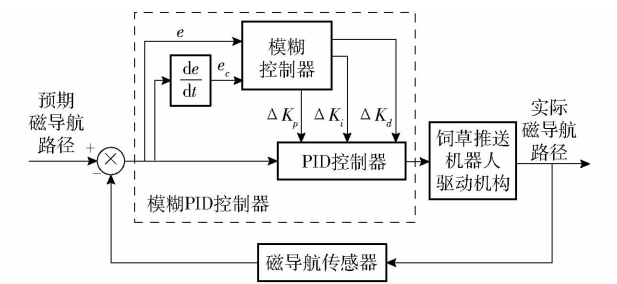


图 10 磁导航控制系统框图

Fig. 10 Block diagram of magnetic navigation control system

$$v_L(n) = v_{0L} - (K_p + \Delta K_p)e(n) - (K_i + \Delta K_i) \cdot \sum_{i=1}^n e(i) - (K_d + \Delta K_d)(e(n) - e(n-1)) \quad (2)$$

式中 $v_L(n)$ ——第 n 次采样时刻点的左驱动轮速度, m/s

$$v_{0L}$$
——左驱动轮的初始速度, m/s

$$v_R(n) = v_{0R} + (K_p + \Delta K_p)e(n) + (K_i + \Delta K_i) \cdot \sum_{i=1}^n e(i) + (K_d + \Delta K_d)(e(n) - e(n-1)) \quad (3)$$

式中 $v_R(n)$ ——第 n 次采样时刻点的右驱动轮速度, m/s

v_{0R} ——右驱动轮的初始速度, m/s

饲草推送机器人磁导航采用差速实现运动方向控制,可得到其左、右驱动轮轮速的模糊 PID 控制律如式(2)、(3)所示。其中,由于左、右电动机采用同种型号,左、右电动机 PID 控制器系数初始值设为一致。将饲草推送机器人左、右轮速转换成对应驱动电动机角速度,控制器输出对应占空比的 PWM 信号控制驱动电动机转速。

3.2 模糊控制器规则设计

模糊控制器的核心是制定合理有效的模糊规则^[20]。根据专家经验和大量试验可知,磁导航偏差、偏差变化率与 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 之间存在最优调整关系。结合磁导航传感器特性和试验得到模糊控制器的论域和模糊子集:

- (1)磁导航偏差 e 论域为 $[-8,8]$,单位 cm;用 7 个模糊子集涵盖 e :正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(O)、负小(NS)、负中(NM)和负大(NB)。
- (2)磁导航偏差变化率 e_c 论域为 $[-4,4]$,单位 cm/s;用 3 个模糊子集涵盖 e_c :正(PS)、零(O)、负(NS)。
- (3)比例系数调整量 ΔK_p 论域为 $[-3,3]$;通过 5 个模糊子集涵盖 ΔK_p :正大(PB)、正小(PS)、零(O)、负小(NS)和负大(NB)。

(4)积分系数调整量 ΔK_i 的论域为 $[-2,2]$;通过 5 个模糊子集涵盖 ΔK_i :大(PB)、正小(PS)、零(O)、负小(NS)和负大(NB)。

(5)微分系数调整量 ΔK_d 的论域为 $[-3,3]$;通过 5 个模糊子集涵盖 ΔK_d :正大(PB)、正小(PS)、零(O)、负小(NS)和负大(NB)。

表 1~3 分别是 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 调整的模糊规则。将模糊控制移植到饲草推送机器人处理器时,需通过 Matlab 产生对应输出量的模糊规则表,即将模糊规则转换成控制器可直接处理的数字量,控制器按照查表形式获取模糊输出。模糊推理系统按照上述表中规则,根据实际的 e 和 e_c 的值,进行近似推理获得 PID 控制器 3 个系数的调整值,实现系数的动态调整。

表 1 比例系数调整的模糊规则

Tab. 1 Fuzzy rule for adjustment of ratio coefficient

e_c	e				
	NB	NS	O	PS	PB
NS	PB	NB	PS	NB	PB
O	PS	NS	PS	NS	PS
PS	PS	NS	PS	NS	PB

表 2 积分系数调整的模糊规则

Tab. 2 Fuzzy rule for adjustment of integral coefficient

e_c	e				
	NB	NS	O	PS	PB
NS	PB	PS	PS	PS	NB
O	NS	PS	O	PS	NS
PS	NS	PB	PS	PB	NB

表 3 微分系数调整的模糊规则

Tab. 3 Fuzzy rules for adjustment of differential coefficients

e_c	e				
	NB	NS	O	PS	PB
NS	PB	NS	PS	NS	PB
O	PS	NS	PS	NS	PS
PS	PB	NB	PS	NB	PB

图 11 是比例系数调整规则,磁导航偏差绝对值较大时,比例系数调整值也相应较大。

图 12 是积分系数调整规则,当磁导航偏差相对较小时,适当增大积分系数,积分环节可以持续累积偏差,然后累积后的偏差作为控制输入以减小稳态误差。

图 13 是微分系数调整规则,当磁导航偏差较大时,应适当增大微分系数,微分环节可以提前预测偏差变化趋势,实现预测与反馈控制。

3.3 模糊 PID 控制算法流程

如图 14 所示,饲草推送机器人控制器采用查表

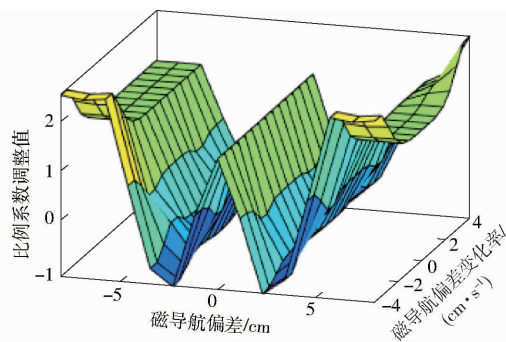


图 11 比例系数调整规则

Fig. 11 Regulation of proportional coefficient adjustment

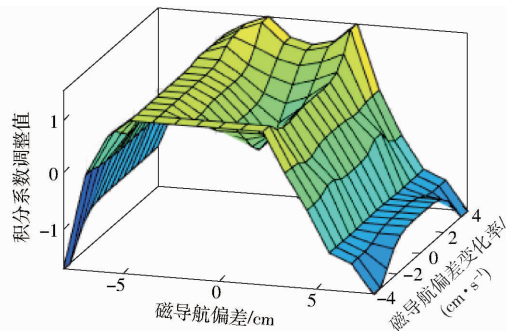


图 12 积分系数调整规则

Fig. 12 Regulation of integral coefficient adjustment

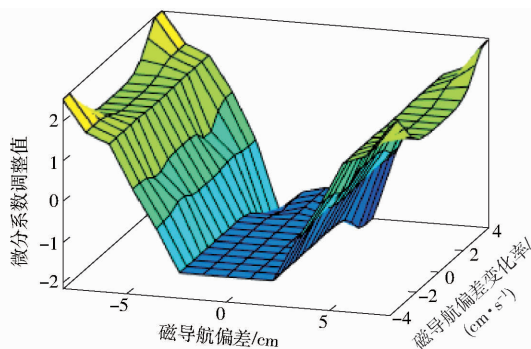


图 13 微分系数调整规则

Fig. 13 Regulation of differential coefficient adjustment

的形式执行模糊 PID 控制算法。首先采集第 n 次采样时刻点的磁导航偏差 $e(n)$, 并对 $e(n)$ 的范围进行判断, 限制其值在规定的论域内, 然后计算第 n 次采样时刻点的磁导航偏差变化率 $e_c(n)$, 同理, 对其范围进行判断, 限制其值在规定的论域内, 并将 $e(n)$ 、 $e_c(n)$ 模糊化, 然后通过查询模糊控制规则表获取 PID 控制器系数调整值, 得到调整后的 PID 控制器系数, 其次通过 PID 算法计算出饲草推送机器人左、右轮的控制信号 PWM 值, 实现饲草推送机器人行走方向和速度的调整, 最后序号 n 累加 1, 循环执行模糊 PID 控制算法。

4 试验与分析

如图 15 所示, 充电桩安装于充电区域指定位

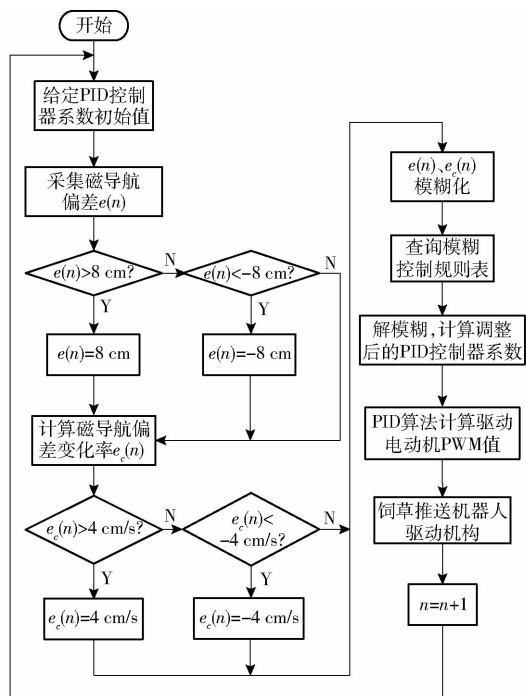


图 14 模糊 PID 控制算法流程

Fig. 14 Fuzzy PID control algorithm flow

置, 采用 220 V 交流电供电; 充电桩为封闭结构, 其电极外伸, 只有当内部充电电路导通时, 电极才带电, 否则电极不带电, 充电桩工作时, 绿色的电源指示灯亮, 指示充电桩工作状态。ARM 终端安装于饲草推送机器人上。在自动充电区域安装导航磁条, 导航磁条按预先设计的导航路径进行安装, 包括直线段和圆弧段, 充电导航起点位于牛场走廊入口处, 充电导航终点位于牛场走廊入口的另一侧。

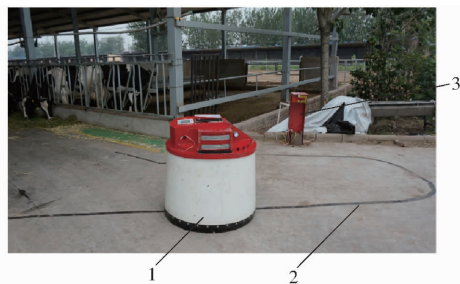


图 15 自动充电系统试验

Fig. 15 Test of automatic charging system

1. 饲草推送机器人 2. 导航磁条 3. 充电桩

表 4 中, 11 次对接试验成功率 100%。11 次试验中, 当磁导航偏差绝对值取得最大值时, 对应的 PID 控制器系数的调整值如图 16 所示。其中, 比例系数调整值 ΔK_p 最大值为 1.28, 最小值为 1.03; 积分系数调整值 ΔK_i 最大值为 0.13, 最小值为 0.06; 微分系数调整值 ΔK_d 最大为 -1.18, 最小值为 -1.5。

图 17 是每次试验中 X 、 Y 和 Z 方向的对接偏差值。 X 轴最大对接偏差绝对值 $|E_x|_{\max} = 4.1$ cm, 在

表 4 磁导航偏差和对接状态

Tab.4 Navigation deviation and docking state of docking test

试验 序号	最大磁导航偏差绝 对值 $ e_l _{\max}/\text{cm}$	最大磁导航偏差变化率 绝对值 $ e_c _{\max}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	对接 状态
1	2.0	1.1	成功
2	2.1	0.9	成功
3	2.6	1.4	成功
4	1.5	1.0	成功
5	1.9	0.8	成功
6	2.4	1.1	成功
7	2.1	1.3	成功
8	1.1	1.6	成功
9	1.6	0.9	成功
10	2.5	1.4	成功
11	2.0	2.1	成功

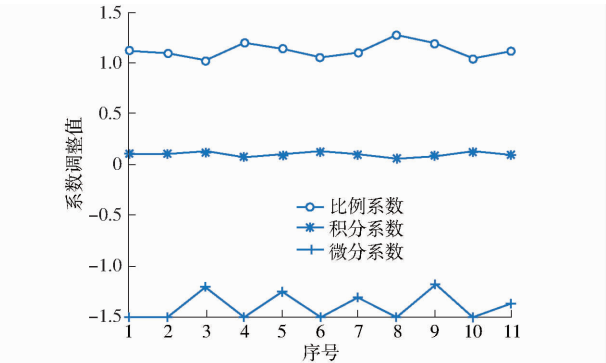


图 16 PID 控制器系数调整值

Fig. 16 Coefficient adjustment value of PID controller

X 轴对接容错范围 $(-34.35\text{ cm}, 34.35\text{ cm})$ 内; Y 轴最大对接偏差绝对值 $|E_y|_{\max} = 1.9\text{ cm}$, 在 Y 轴对接

容错范围 $(-3\text{ cm}, 3\text{ cm})$ 之内; Z 轴最大对接偏差绝对值 $|E_z|_{\max} = 0.7\text{ cm}$, 在 Z 轴对接容错范围 $(-2\text{ cm}, 2\text{ cm})$ 内。

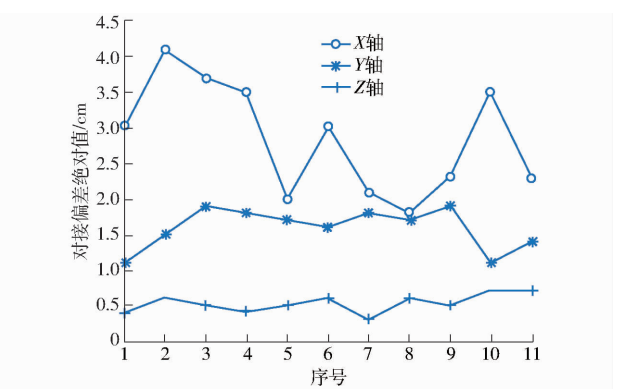


图 17 充电对接偏差

Fig. 17 Charging and docking deviation

5 结论

(1)采用模糊 PID 控制自动充电导航,结合磁导航传感器特性和试验,获得模糊控制器的输出参数调整规则。磁条导航充电对接试验结果表明,当磁导航偏差绝对值 $|e_l|$ 为最大值时,比例系数调整值 ΔK_p 最大值为 1.28,最小值为 1.03;积分系数调整值 ΔK_i 最大值为 0.13,最小值为 0.06;微分系数调整值 ΔK_d 最大值为 -1.18 ,最小值为 -1.5 。

(2)磁条导航充电对接试验表明,通过模糊 PID 控制,PID 控制器系数可进行自适应修正。 X 轴、 Y 轴和 Z 轴最大对接偏差绝对值分别是 4.1、1.9、0.7 cm,对接偏差均在容错范围内,可满足磁导航精度要求。

参 考 文 献

1 NOURBAKSH I R, BOBENAGE J, GRANGE S, et al. An affective mobile robot educator with a full-time job[J]. Artificial Intelligence, 1999, 114(1-2):95-124.

2 LUO C, WU Y T, KRISHNAN M, et al. An effective search and navigation model to an auto-recharging station of driverless vehicles[C]//IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, IEEE, 2015:100-107.

3 CHIEN T L, SU K L, GUO H. The multiple interface security robot-WFSR-II[C]//Safety, Security and Rescue Robotics, Workshop, 2005 IEEE International. IEEE, 2005:47-52.

4 SU K L, LIAO Y L, LIN S P, et al. An interactive auto-recharging system for mobile robots[J]. International Journal of Automation & Smart Technology, 2014, 4(1):43-53.

5 LUO R C, HUANG J T, CHEN O. A triangular selection path planning method with dead reckoning system for wireless mobile sensor mote[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2007:162-168.

6 ROH S G, PARK J H, SONG Y K, et al. Flexible docking mechanism using combination of magnetic force with error-compensation capability[C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2008:697-702.

7 LUO R C, LIAO C T, SU K L, et al. Automatic docking and recharging system for autonomous security robot[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2005:2953-2958.

8 万树春. 基于双目视觉的充电插座目标定位算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.

WAN Shuchun. Study of electrical outlet localization algorithm based on binocular vision[D]. Changchun: Jinlin University, 2015. (in Chinese)

9 SU K L, CHIEN T L, LIANG C Y. Develop a self-diagnosis function auto-recharging device for mobile robot[C]//Safety, Security and Rescue Robotics, Workshop, 2005 IEEE International. IEEE, 2005:1-6.

http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180506&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.006.

LIU Deying, WANG Jialiang, LIN Xiangze, et al. Automatic identification method for *Sogatella furcifera* based on convolutional neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):51–56. (in Chinese)

15 卢伟, 胡海阳, 王家鹏, 等. 基于卷积神经网络面部图像识别的拖拉机驾驶员疲劳检测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):192–199.

LU Wei, HU Haiyang, WANG Jiapeng, et al. Tractor driver fatigue detection based on convolution neural network and facial image recognition[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7):192–199. (in Chinese)

16 GAVRIILIDIS A, VELTEN J, TILGNER S, et al. Machine learning for people detection in guidance functionality of enabling health applications by means of cascaded SVM classifiers[J]. Journal of the Franklin Institute,2018,355(4):2009–2021.

17 马蓓蓓. 基于 HOG 特征的车辆检测技术研究[D]. 广州: 华南理工大学,2015.

MA Beibei. The technology research of vehicle detection based on HOG features[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)

18 GREENHALGH J, MIRMEHDI M. Real-time detection and recognition of road traffic signs[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(4):1498–1506.

19 徐渊, 许晓亮, 李才年, 等. 结合 SVM 分类器与 HOG 特征提取的行人检测[J]. 计算机工程, 2016, 42(1):56–60,65.

XU Yuan, XU Xiaoliang, LI Cainian, et al. Pedestrian detection combining with SVM classifier and HOG feature extraction[J]. Computer Engineering, 2016, 42(1): 56–60, 65. (in Chinese)

20 吴迪, 蔡晓东, 华娜, 等. 基于 HOG 和 SVM 的级别自适应车型识别算法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016, 36(1): 23–28.

WU Di, CAI Xiaodong, HUA Na, et al. A level-adaptive algorithm for vehicle types recognition algorithm based on HOG and SVM[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2016, 36(1):23–28. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 7 页)

10 贾楠, 杜松怀, 李蔚, 等. 我国自动化奶牛饲喂技术及装备研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2015, 51(22):51–55.

JIA Nan, DU Songhuai, LI Wei, et al. Progress in automatic feeding equipment for dairy cattle[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2015, 51(22):51–55. (in Chinese)

11 焦盼德, 贺成柱, 杨军平. 奶牛智能推料机器人的研制[J]. 中国农机化学报, 2018,39(1):74–77.

JIAO Pande, HE Chengzhu, YANG Junping. Development and manufacture of intelligent push feed robot for cows[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(1):74–77. (in Chinese)

12 杨亮, 潘晓花, 郑姗姗, 等. 奶牛饲喂自动机电控制系统的设计与试验[C]//中国畜牧兽医学会信息技术分会学术研讨会, 2017.

13 高振江, 郭跃虎, 蒙贺伟, 等. 自走式奶牛精确饲喂机控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):226–230. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20121142&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121142&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.042.

GAO Zhenjiang, GUO Yuehu, MENG Hewei, et al. Design of self-propelled precise feeding machine control system for single dairy cow[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):226–230. (in Chinese)

14 蒙贺伟, 郭跃虎, 高振江, 等. 双模自走式奶牛精确饲喂装备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2):52–56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130211&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130211&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.011.

MENG Hewei, GUO Yuehu, GAO Zhenjiang, et al. Design and experiment on dual-mode self-propelled precise feeding equipment for dairy cow[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2):52–56. (in Chinese)

15 吴刚, 王晨, 李世雄, 等. 一种饲草推送装置: 201510606968.3[P]. 2018–02–09.

16 谭彧, 李景行, 李宝胜, 等. 一种基于摩擦随动回转的饲草推送装置: 201710067992.3[P]. 2017–06–13.

17 吴刚, 王晨, 李世雄, 等. 一种饲草推送器的自动安全充电系统: 201510671051.1[P]. 2018–03–13.

18 仇成群, 刘成林, 沈法华, 等. 基于 Matlab 和模糊 PID 的汽车巡航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 197–202.

QIU Chengqun, LIU Chenglin, SHEN Fahua, et al. Design of automobile cruise control system based on Matlab and fuzzy PID[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 197–202. (in Chinese)

19 刘浩蓬, 龙长江, 万鹏, 等. 植保四轴飞行器的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2015,31(1): 71–77.

LIU Haopeng, LONG Changjiang, WAN Peng, et al. Fuzzy self-adjusting proportion integration differentiation for eppo quadcopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1): 71–77. (in Chinese)

20 苏中滨, 章宗鑫, 马晨茗, 等. 模糊 PID 控制无人自旋旋翼机飞行姿态仿真[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(2):64–72.

SU Zhongbin, ZHANG Zongxin, MA Chenming, et al. Simulation of fuzzy PID control on flight attitude of unmanned autogyro[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(2): 64–72. (in Chinese)