

移动目标追踪系统的设计及实现

张建峰, 秦飞舟

(宁夏大学 物理与电子电气工程学院, 银川 750021)

摘要: 移动目标追踪系统可以实现智能小车对运动的物体进行识别、循迹、追踪等; 采用智能路径规划方法, 借助 STM32 主控制芯片, 以其丰富的硬件资源为基础, 连接可编程的 OPENMV 摄像头模块、电机驱动模块、电机和编码器, 使用 C 语言进行控制编程, 设计了一款移动目标追踪系统; 摄像头对物体采集图像, 计算出物体的坐标和物体与小车的距离, 传给主控制器; 主控制器将小车的坐标与小车到物体的距离作为 PID 算法的输入, 通过优化后的 PID 算法调节 PWM 去控制电机运行, 完成对物体的循迹、追踪; 实验结果表明, 在优化后的 PID 算法的控制下, 无论物体是运动还是静止, 小车都能够比传统的 PID 算法控制更加快速、稳定的追踪到物体, 直到小车追踪到物体并且稳定的保持相对静止状态。

关键词: STM32; 移动目标追踪; PID 算法

Design and Implementation of Moving Target Tracking System

ZHANG Jianfeng, QIN Feizhou

(School of Physics, Electronics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Moving target tracking realizes the functions of recognition, trajectory and track for an intelligent car to moving objects. With the help of the STM32 master control chip, and based on its rich hardware resources, the intelligent path planning method is used to be connected the programmable OPENMV camera module, motor driver module, motor and encoder, and C language for control programming is used to design a moving target tracking system. The camera collects the images of the object, the coordinates of the object and the distance are calculated between the object and car, which is sent to the main controller. The main controller takes the coordinates of the car and the distance from the car to the object as the input of PID algorithm, adjusts the PWM to control the motor operation through the optimized PID algorithm, and completes the trajectory and tracking of the object. The experimental results show that under the control of the optimized PID algorithm, no matter the object is motion or stationary, the optimized PID algorithm has more quick and stably than traditional PID algorithm, until the car tracks the object and keeps the relative static state stably.

Keywords: STM32; moving target tracking; PID algorithm

0 引言

用一些智能化设备的操作代替传统的手工操作可以使得生产效率更快、产品质量更高, 而效率快、质量好的前提是拥有一台比较稳定、反应迅速的装置。在智能分拣快递、机器焊接元器件设备等一些自动化设备中, 能够快速识别并稳定迅速的执行任务离不开一个好的算法, 而作为传统经典的 PID 算法是自动控制、人工智能领域中一个非常普遍用到的算法^[1-4]。

在工业过程控制中, 根据被控对象的实时数据采集的信息与预设值比较产生的误差的比例、积分和微分进行控制的控制系统, 简称 PID (proportional integral derivative) 控制系统。PID 控制具有原理简单, 鲁棒性强和实用广等优点, 是一种技术成熟、应用广泛的控制系统^[5]。

本设计采用 PID 算法控制小车的前进速度以及行走的方向^[6], 实现对物体的循迹、追踪^[7]。并在传统的 PID 算

法的基础上加以改进, 使得小车更快、更稳定的进行物体循迹与追踪^[8-11]。

1 系统的总体设计

该系统采用分布式控制系统, 系统框图如图 1 所示, 系统由摄像头模块, 主控制器, 电机驱动, 电机, 编码器以及电源组成。

其中电源模块为整个系统供电。摄像头模块采集一幅图像处理后, 将得到的物体的坐标以及物体到小车的距离传给主控制器, 主控制器接收摄像头和编码器传入的数据, 通过优化 PID 算法计算出小车的应当行走速度以及方向, 使电机驱动模块驱动电机, 实现对物体的循迹追踪。

2 系统硬件设计

移动目标追踪系统的硬件包括主控芯片、摄像头模块、电源模块、电机驱动模块以及编码器模块。

电源选择 11.1 V 航模电池作为输入, 通过 LM2596S

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-08-30。

基金项目: 国家自然科学基金(62066038)。

作者简介: 张建峰(1997-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 主要从事智能仪器与检测技术方向的研究。

秦飞舟(1972-), 女, 江苏泰兴人, 硕士, 教授, 主要从事计算机软件、物联网技术教学及应用开发方向的研究。

引用格式: 张建峰, 秦飞舟. 移动目标追踪系统的设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 149-154, 161.

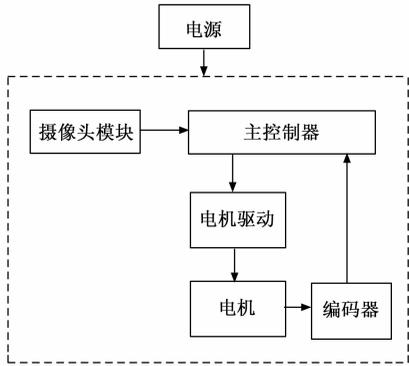


图 1 系统框图

稳压芯片输出稳定的 5 V 电压，通过 LM1117 稳压芯片输出稳定的 3.3 V 电压，实现对外部模块提供 3.3 V 和 5 V 的电源。

为了保证本次设计的所有硬件资源需求以及小车运行过程中无延迟的现象，选择一款内部硬件资源丰富、运行速度快的芯片尤为重要，最终选择了 STM32F407ZGT6 作为主控芯片，该芯片运行速度最大可达到 168 MHz、定时器有 14 个，是一款稳定可靠的芯片^[12]。

2.1 openmv 摄像头模块

追踪移动目标的摄像头模块选择的是 OPENMV 模块，该模块集成的 STM32H7 芯片对所采集到的物体图像进行了分析，得到了所追踪目标的定位坐标，通过串口的形式把定位坐标以及小车到目标的距离传给主控制器^[13]。

OPENMV 模块集成了 STM32H7 芯片和 OV7725 摄像头，提供了供电和串口引脚。在 STM32H7 内部集成了一些处理算法，以函数形式提供，通过 python 语言去编写处理程序，将物体坐标和物体到小车的距离发送给主控制器。

2.2 编码器测速模块

编码器测速模块主要由霍尔传感器组成，选用的是 STM15-P25 双霍尔磁性编码器^[14]。

双霍尔磁性编码器由磁栅和磁敏两个元件构成。该模块连接到电机的转轴上，通过电机的转速的变化，霍尔传感器在 A、B 相位引脚产生两个 50% 占空比的方波，这两个方波相位相差 1/4 个周期。STM32 芯片通过定时器编码器采集的功能或者定时器输入捕获的方式即可采集到小车的转速，为 PID 闭环控制做准备。

2.3 电机驱动模块

小车轮子选用的是麦克纳姆轮，由 4 个电机分别驱动。由于单片机输出的电流最大不超过 200 mA，不足以驱动电机，所以需要加入电机驱动电路。

驱动芯片选择的是 L298N，该芯片最大输出功率为 25 W，通过输入 PWM 波可控制电机的正反转，其电路图如图 2 所示^[15]。

由于一个 L298N 模块可以驱动两路电机，小车采用 4 轮驱动^[5]，所以需要两个 L298N 模块，给该模块输入 12 V 电压以保证芯片正常工作。通过 EN_A 引脚输入 50 Hz 的可调占空比去控制小车的转速，占空比越大小车转的越快。

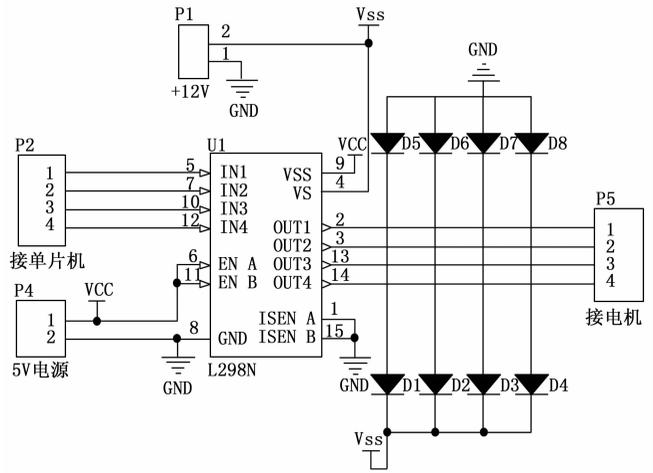


图 2 L298N 模块电路图

通过 IN1 引脚和 IN2 引脚，可以实现对电机方向的控制^[16]，具体引脚与运行情况如表 1 所列。其中 PWM_EN 代表 PWM 使能，PWM_DIS 代表 PWM 失能，H 代表高电平，L 代表低电平，X 代表引脚失能。

表 1 电机方向控制表

ENA	IN1	IN2	电机
PWM_EN	H	L	正传
PWM_EN	L	H	反转
PWM_EN	H	H	停止
PWM_EN	L	L	停止
PWM_DIS	X	X	停止

3 系统软件设计

移动目标追踪系统软件包括摄像头和主控制器的软件。其中摄像头程序使用的是 PYTHON 语言开发，根据“星瞳”科技公司提供的 PYTHON 库，可以直接在厂商提供的 IDE 编译器进行编程。主控制器程序根据 ST 公司提供的库函数，使用 KeilC5 平台进行开发。

系统主控流程如图 3 所示。首先是各模块的初始化，包括串口、PWM、编码器的定时器初始化、IO 初始化等。然后主控芯片发出启动小车自转指令，当摄像头模块检测到目标物体之后，摄像头模块会给主控制器发送信号，当主控制器接收到摄像头发送的数据可以知道物体的坐标和物体到小车的距离信息，就可以执行优化后的 PID 算法去计算 PWM 值从而控制电机，实现对物体的定位、追踪、循迹，当追踪到小球后小车停止运行。

3.1 摄像头驱动程序设计

摄像头程序采集图片的格式为 RGB565、图片的尺寸为 240×320、图片刷新时间为 1 ms 等。小车可以识别不同颜色的物体，通过设置图像识别的阈值实现对颜色的选择。本次设置选择红色物体，主程序不断采集图像，当检测到红色物体时，程序会在红色物体的上、下、左、右 4 个方向的边缘点处描绘一个白色正方形虚线边框如图 4 所示，把红色物体包围起来。通过描绘的正方形白色虚线边框的长

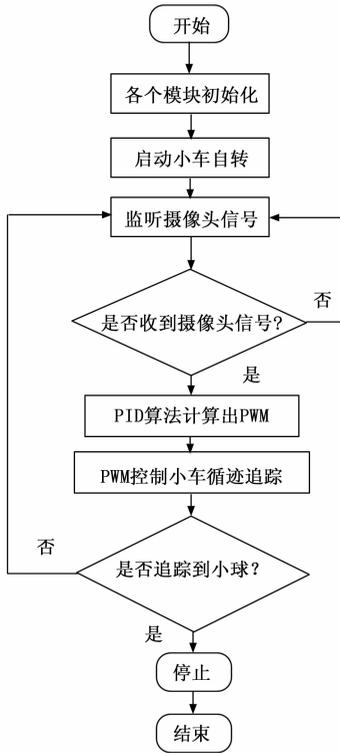


图 3 主控制流程图

与宽计算出正方形的面积除以比例系数减去常数就是小车和红色物体的相对距离。其距离的计算公式为:

$$distance = i_length * i_width / prop - k$$

其中: $distance$ 代表小车与物体的距离; i_length 代表物体白色虚线边框的长; i_width 代表白色虚线边框的宽; $prop$ 代表距离与面积的比例系数, 为负数; k 代表初始常数。

当小车离物体越来越近时, 算出的面积也就越来越大, 距离也就越来越小。通过算出的距离减去给定的距离 (想让小车与物体相隔多远的距离) 就是距离偏差, 为 PID 闭环控制做准备。其距离偏差的表达式为:

$$h_error = distance - d_need$$

其中: $distance$ 代表小车与物体的实时的距离; d_need 代表给定的距离; h_error 代表距离的测量值与实际需要值的偏差。

用描绘物体白色边框的中心点横坐标减去一幅图像的长除以 2 即可得到物体与小车的位置偏差, 其表达式为:

$$x_error = i_centre - p_length / 2$$

其中: i_centre 代表白色边框中心点的横坐标; p_length 代表一幅图像的长度; x_error 代表测量值与实际需要值的方向偏差。

最后通过串口将距离偏差和方向偏差传给主控制器。具体流程图如图 5 所示。

3.2 电机优化 PID 算法程序设计

3.2.1 PID 算法

PID 算法作为自动控制领域中经典算法, 常用于温度控

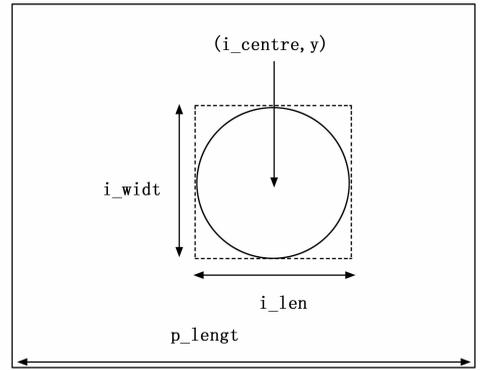


图 4 图像参数说明

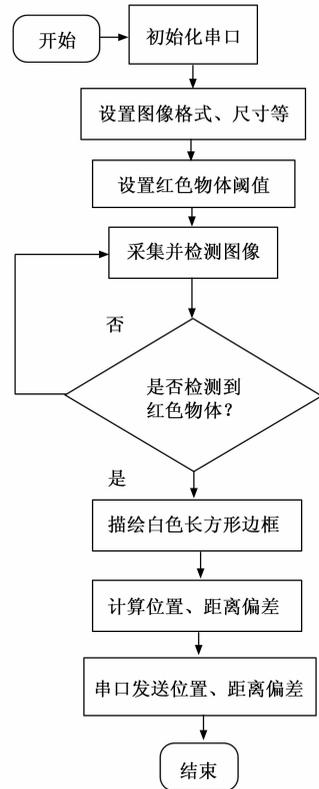


图 5 摄像头程序流程图

制、水位控制、电机调速等多种闭环控制。PID 算法中的 P、I、D 分别代表比例、积分、微分参数, PID 分为位置式 PID 和增量式 PID^[17]。

位置式 PID 的公式为:

$$u(k) = Kp * e(k) + Ki * \sum_{i=0}^k e(i) + Kd * [e(k) - e(k-1)]$$

增量式 PID 的公式为:

$$u(k) = Kp * [e(k) - e(k-1)] + Ki * e(k) + Kd * [E(k) - 2e(k-1) - e(k-2)]$$

其中: $u(k)$ 代表当前 PID 计算输出值。 Kp 、 Ki 、 Kd 是 PID 算法的系数。 $e(k)$ 是当前偏差, $e(k-1)$ 代表上一次偏差, $e(k-2)$ 代表上两次偏差, $e(k-i)$ 代表

上 i 次偏差。

由位置式 PID 算法和增量式 PID 算法可以看出，两个公式都包含当前偏差乘以系数和上一次偏差乘以系数，差别在于位置式 PID 把每次偏差累加乘以系数进行计算，而增量式 PID 是计算上两次偏差乘以系数。

两者 PID 的功能都有一阶惯性滤波，区别在于位置式 PID 把每次偏差进行累加起到一个饱和抑制的作用，而增量式 PID 则是把上一次与上两次偏差进行相减起到一个对系统动态过程加速的功能。

因此，位置式 PID 更加适用于控制某个不变量、稳定值，如保持水位高度、无人机悬停、保持温湿度等，因为有累加的过程计算量非常大，若系统出现故障等大幅度变化的情况，系统也会相应做出大幅度的改变。增量式 PID 比较适合用在输出不断变化的系统中，比如电机控制速度、舵机控制方向等，因为做了二次超调的计算即得到上一次偏差与上两次偏差的差值，从而快速接近目标值^[18-19]。

3.2.2 传统 PID 算法控制电机

电机驱动程序流程图如图 6 所示，电机使用 STM32 输出 50 Hz 可变占空比的 PWM，可以控制驱动电机的快慢，同时为了保持速度稳定、反应迅速需要加入 PID 闭环控制算法。

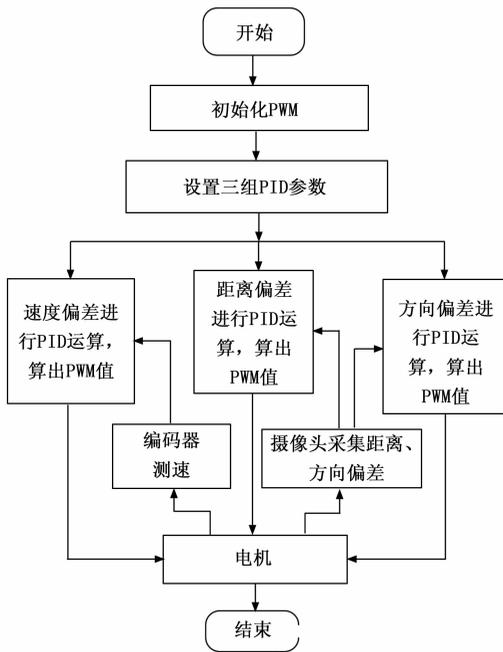


图 6 电机驱动程序流程图

本设计中 PID 算法控制电机包含 3 个部分，分别是速度控制 PID，方向控制 PID，距离控制 PID。

其中速度 PID 根据编码器测量的速度与给定小车的速度的偏差进行 PID 运算，再根据所计算的 PWM 值控制小车从一个速度到另一个速度的加速、减速。方向 PID 根据摄像头采集到的物体相对小车的中心点的偏差进行 PID 运算，计算出 PWM 去控制小车的左右移动。距离 PID 根据

摄像头采集到的物体与小车的距离偏差进行 PID 运算，计算出 PWM 去控制小车前后移动。

3 种 PID 原理一样，都是通过给定值与测量值的偏差作为 PID 的参数，PID 函数运算返回 PWM 的值，只是偏差不同和 P 、 I 、 D 系数不同，算出最后的 PWM 值的结果也就不同。

PID 算法可以不需要 I 系数、 D 系数或者 I 、 D 系数，只要系统能够保持稳定单纯的用 P 系数进行调节，也可以达到很好的效果。经过反复的调试，本次设计只需要比例项和微分项就可以达到很好的效果，所以选择位置式 PID 和增量式 PID 效果一样。所以本设计 PID 公式为：

$$IncPid = KP * EE0 + KI * (EE0 - EE1)$$

其中： KP 、 KI 分别为 PID 算法中的 P 、 I 参数； $EE0$ 代表实际值与测量值的偏差也就是当前偏差； $EE1$ 代表上次偏差也就是程序执行第二次的上次偏差；当前偏差是给定值与测量值的差值，通过不断调节 P 、 I 参数确保小车能够更快更准的达到预期的值。

3.2.3 优化 PID 算法控制电机

使用传统 PID 调试小车，是通过调节 P 、 I 、 D 参数使用小车的输出值呈现“发散”、“等幅振荡”、“合理”、“不达标”4 种情况。

理想的情况下，传统 PID 会开始出现超调，随后缓慢恢复稳定值。而本次的优化在原有的基础上加入超调校正和边缘处理算法，让小车更稳定的运行，如图 7 所示为输出值在理想情况下合理的曲线。

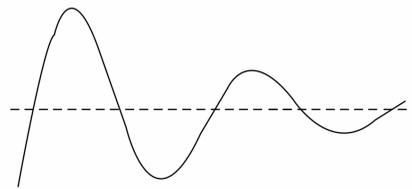


图 7 传统 PID 输出合理的曲线

超调校正是一个较大的超调角度，即 P 系数比较大，这样可以让小车刚开始用比较快的速度启动也就是加速度更大，让小车更快的到达实际值，在这种情况下，将会出现“等幅振荡”或者“发散”现象。为了防止该现象，PID 函数执一次，程序计算偏差三次，也就是把反馈采集的数据速度调节到 PID 函数运行的三倍，这样会使小车开始会以较大的加速度运行，当还没有到达目标值时，此时反馈原件再次计算偏差，此时的偏差已经较小就不会出现“等幅振荡”现象，但是会出现输出值稳定的时间加长现象。

边缘处理算法就是对超调校正出现稳定时间较长的缺点进行修正。边缘处理算法就是对输出值的上限进行设置，保证上限值不会太大，以及配合调节参数 I ，这样就不会现象大幅度的抖动的现象，也可以减少输出值稳定时间长的问题，其优化后的理论输出值曲线为图 8 所示。

通过与传统 PID 算法的对比，我们可以清楚的看出，优化后的 PID 输出的曲线到达目标值的速度更加迅速，由

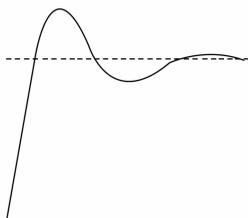


图 8 优化 PID 输出合理的曲线

于对上限进行了设置将不会出现“等幅振荡”和“发散”的现象。

4 实验结果与分析

为了验证所设计的移动目标追踪系统的优越性, 设计了对比实验。分别在移动目标追踪系统的小车上采用传统 PID 控制算法与优化后的 PID 控制算法去控制小车, 实现对物体的追踪、循迹^[20-25]。移动目标追踪系统的优越性可以根据小车追踪物体的时间和稳定性综合考虑, 当小车追踪物体的时间越短、到达目标位置稳定性越好代表该系统越优越。实验分为两组分别为: 物体动态运动时, 传统 PID 算法控制; 物体动态运动时, 优化 PID 算法控制^[26-31]。

在物体以一定速度运动过程中, 利用传统 PID 控制小车对物体进行自动追逐。小车的速度可以通过串口将编码器测量出的速度值发送给 PC 端, PC 端可以观察出小车 4 个轮子行驶的速度。通过小车在运行的过程发送给 PC 端的速度数据, 可以判断出小车到达稳定时所用时间的长短。通过小车稳定时小车轮子速度的变化范围即可看出小车稳定性的强度^[32-40]。

4.1 物体动态运动时, 传统 PID 控制

当小车用传统 PID 控制算法时, 得出的数据如图 9 所示。最初小车会以 880 的速度前进, 当小车速度到达 520 的速度趋于平稳, 速度的抖动幅度为 40。

4.2 物体动态运动时, 优化 PID 控制

当小车用优化 PID 控制算法时, 得出的数据如图 10 所示。最初小车会以 880 的速度前进, 当小车速度达到 240 的速度趋于平稳, 速度抖动幅度为 30。

通过 1、2 对比我们可以看出传统 PID 算法控制相对优化后的 PID 算法第一次到速度稳定值的时间相对较长, 速度稳定时上下幅度范围较大。

综合上述实验结果可以得出结论, 无论是传统 PID 控制算法还是优化后的 PID 算法都可以完成对移动物体的追踪、循迹。基于移动目标追踪系统的基础上, 用优化 PID 控制算法代替传统 PID 控制算法可以更快、更稳定的对物体进行追踪、循迹^[41-50]。

5 结束语

该系统以 STM32 为主控制器, 通过与摄像头交互以及硬件 PCB 的设计完成了移动目标追踪系统的设计^[51-54]。该移动目标追踪系统能够应用在自动跟随行李箱、自动追踪人脸识别等设备中, 具有非常好的实用和应用价值^[55-57]。

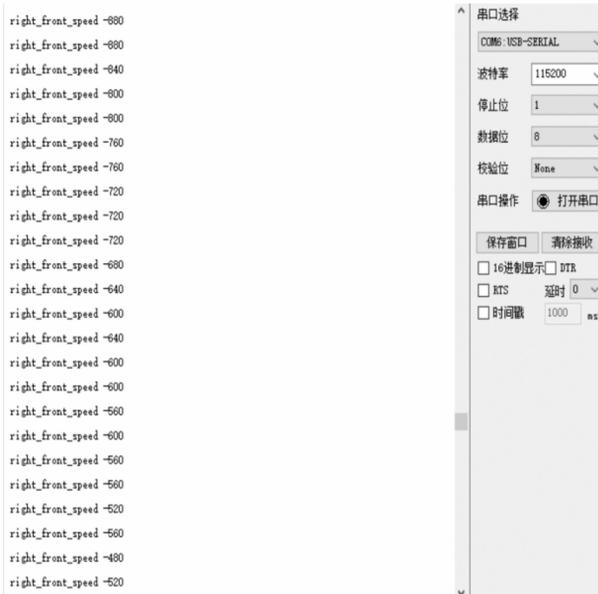


图 9 传统 PID 算法小车的速度

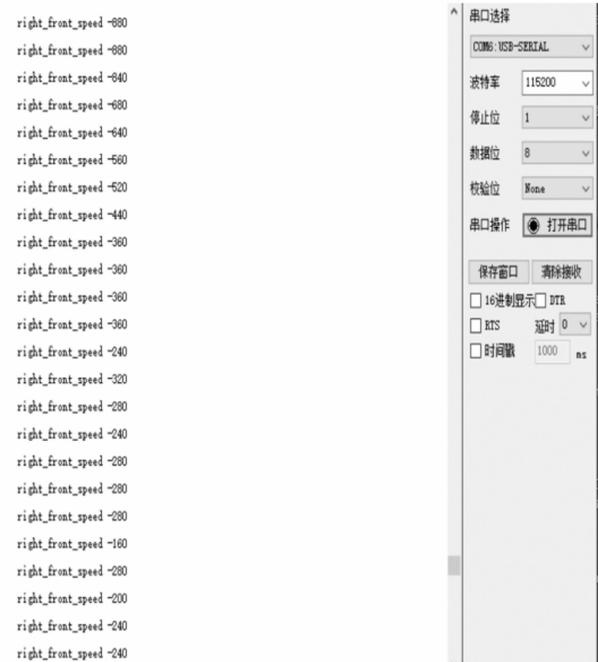


图 10 优化 PID 算法小车的速度

该系统在传统 PID 算法控制小车的基础上, 加入超调校正与边缘处理算法让小车更快准的达到给定值, 让小车反应更加灵敏、反应更加迅速^[58-59]。

该小车有着较低的成本外观小巧且能够追踪到各种各样劣势的环境下的物体的优点, 在未来引入物联网还可以使小车能够更加智能化^[60]。

参考文献:

[1] 吴 玫. 粒子群优化算法进展研究 [J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2018 (12): 167 - 168.

- [2] 黎会鹏, 毕博伦, 刘保怀. 太阳能光伏检测跟踪与自动灌溉实验装置 [J]. 电脑知识与技术, 2020 (35): 222-224.
- [3] 谢国坤. 角度自动控制系统的设计 [J]. 计算机技术与发展, 2020 (7): 210-214.
- [4] 王跃臻, 王文革, 陶阿嵘. 太阳能主动追踪装置研究 [J]. 山东工业技术, 2018 (18): 56-57.
- [5] 黄炎, 邵宇鹰, 邓丽, 等. 改进的 PID 算法在加热炉温度控制中的应用 [J]. 自动化仪表, 2014 (5): 69-71.
- [6] 胡金艳, 李盛, 张宇婷, 等. 小型太阳能自动追踪系统研制 [J]. 无线互联科技, 2016 (21): 39-40.
- [7] 朱国栋. 塔式太阳能发电光场跟踪控制系统研究 [D]. 兰州交通大学, 2018.
- [8] 彭魏玮. 自动化控制技术在太阳能光伏发电系统中的应用研究 [D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [9] 邱阳. 太阳光线跟踪系统设计及其跟踪方式优化研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [10] 王婉婷, 姜国龙, 褚云飞, 等. 从 RCNN 到 YOLO 系列的物体检测系统综述 [J]. 齐鲁工业大学学报, 2021 (5): 9-16.
- [11] 田港, 张鹏, 邹金霖, 等. 基于改进 YOLOv4 的无人机目标检测方法 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2021 (4): 9-14.
- [12] 寇海洋, 段雄鹰. 基于 STM32F407 的时钟同步系统的实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (8): 2759-2761.
- [13] 沈中坤, 徐劲节. 基于 OpenMV 视觉模块和 MPU6050 角度传感器的智慧寻路小车 [J]. 电子制作, 2022 (3): 28-30.
- [14] 刘伟. 霍尔位置传感器在直流无刷电动机控制系统中的应用 [J]. 淮北职业技术学院学报, 2016 (4): 143-144.
- [15] 程章格, 谷若雨, 王海波, 等. TMS320F28027 与 L298N 的悬挂运动控制系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2014 (5): 49-51.
- [16] 马玉敏. PWM 调速系统实现原理分析 [J]. 电子世界, 2014 (12): 492-493.
- [17] 宫鹤, 李佳星. 农机化研究. 基于蛙跳 PID 算法的温室温湿度控制系统设计 [J]. 2021 (1): 186-190.
- [18] 朱嵘涛, 武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2017 (7): 121-126.
- [19] 鲍旭红. 位置式 PID 控制算法在城轨 ATO 系统中的应用 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2017 (3): 84-89.
- [20] 张宪阳, 谢邵春, 丁黎明, 等. 基于 STM32 的温室大棚温度控制系统 [J]. 电子技术与软件工程, 2020 (17): 121-123.
- [21] 徐海川, 张岳, 张鹤舰, 等. 增量式 PID 控制算法在电采暖智能控制系统中应用 [J]. 辽宁科技学院学报, 2019 (1): 21-22.
- [22] 刘亚飞. 基于深度学习的多信息融合行人检测算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [23] 汪涛, 黄崇莉, 于洋, 等. 桥式起重机模糊自适应 PID 防摆控制研究 [J]. 自动化与仪表, 2022 (1): 30-35.
- [24] 杨先德, 王明菱, 王复峰, 等. 中央空调蒸发器后空气温度自适应 PID 控制系统建模 [J]. 湖南理工学院学报 (自然科学版), 2020 (4): 28-34.
- [25] 孙伟翔, 侯森, 戴明阳, 等. 直驱桥式起重机的模糊 PID 控制研究 [J]. 软件导刊, 2021 (10): 150-153.
- [26] 杨斌, 刘振兴, 刘惠康, 等. 基于广义预测控制 PID 算法的桥式起重机吊钩防摆控制器设计 [J]. 制造业自动化, 2020 (3): 117-121.
- [27] 吕宝传, 高晓红, 董帅帅. 基于变论域模糊 PID 的供热系统设计和仿真 [J]. 吉林建筑大学学报, 2021 (6): 75-79.
- [28] 甄丽靖. 基于选择 PID 算法的供热系统水温智能控制方法 [J]. 自动化应用, 2020 (11): 13-14.
- [29] 王娇, 苏刚, 苏阳. 基于模糊 PID 控制的集中供热系统温度控制器的设计 [J]. 天津城建大学学报, 2016 (5): 356-360.
- [30] 刘佳, 温宇强. 基于双模糊 PID 算法的凹版印刷机多轴控制方法 [J]. 数字印刷, 2021 (6): 57-64.
- [31] 孙建康, 王帅, 曹斯萌, 等. 基于模糊 PID 控制的智能循迹小车设计 [J]. 现代制造技术与装备, 2021 (12): 202-205.
- [32] 王小东, 周春桂, 王志军, 等. 基于自适应模糊 PID 的导弹控制系统 [J]. 探测与控制学报, 2021 (6): 50-54.
- [33] 段绍米, 罗会龙, 刘海鹏. 人群搜索和樽海鞘群的混合算法优化 PID 参数 [J]. 系统仿真学报, 2022 (6): 1230-1246.
- [34] 孙莉莉. 基于迭代步进值递减的果蝇优化算法在 PID 整定中的应用 [J]. 石油化工自动化, 2016 (6): 27-30.
- [35] 刘万正, 安冬, 须颖, 等. 自聚合飞蛾火焰优化算法对 PID 参数优化研究 [J]. 机床与液压, 2021 (16): 24-28.
- [36] 王齐, 陈娟, 李全善, 等. 改进生物地理学优化算法及其在 PID 控制器参数中的优化 [J]. 南京理工大学学报, 2017 (4): 519-525.
- [37] 许骏马, 侯石超, 何伟光, 等. 遗传算法与蚁群算法在 PID 优化中的应用比较 [J]. 机电信息, 2013 (15): 114-116.
- [38] 拓守恒, 雍龙泉. 一种用于 PID 控制的教与学优化算法 [J]. 智能系统学报, 2014 (6): 740-746.
- [39] 尹宏鹏, 柴毅. 基于蚁群算法的 PID 控制参数优化 [J]. 计算机工程与应用, 2007 (17): 4-7.
- [40] 王宏民, 陈毅, 陈军伟, 等. 基于模糊-PID 算法护理呼吸机压力控制的设计与实现 [J]. 工程与试验, 2021 (4): 68-72.
- [41] 孙铁成, 张思敏, 李超波. 蚁群算法在 PID 控制中的应用及其参数影响 [J]. 现代电子技术, 2015 (20): 20-25.
- [42] 陈东宁, 张国峰, 姚成玉, 等. 细菌群觅食优化算法及 PID 参数优化应用 [J]. 中国机械工程, 2014 (1): 59-64.
- [43] 刘碧飞, 刘泓滨, 李华文. 基于模糊 PID 算法的智能车电机转速控制研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2021 (1): 93-98.
- [44] 邱润其, 杨雨润. 基于 PID 控制的 1/2 车四自由度主动悬架仿真研究 [J]. 科技与创新, 2022 (1): 69-71.
- [45] 宋丁丁, 解恺, 齐奕森. 基于模糊 PID 的主动悬架设计与控制研究 [J]. 工程技术研究, 2022 (1): 5-8.
- [46] 丁馨铠, 李瑞川, 刘琦, 等. 增强型多参数半主动悬架模糊 PID 控制系统设计与研究 [J]. 现代制造工程, 2022 (3): 54-61.

(下转第 161 页)