

唐宇龙, 付猛, 张皓天, 等. 自适应模糊 PID 的乒乓球发球机控制系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 33-40.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.241004

自适应模糊 PID 的乒乓球发球机控制系统研究

唐宇龙^{1,2}, 付猛^{1,2}, 张皓天^{1,2}, 曹钢^{1,2}, 刘飞宇^{1,2}, 汪语哲^{1,2}

(1 大连民族大学 机电工程学院, 辽宁 大连 116650; 2 大连民族大学 大数据应用技术国家民委重点实验室, 辽宁 大连 116650)

摘要: 乒乓球发球机存在精度不高的问题。针对此问题, 本文设计了一种基于自适应模糊 PID 的乒乓球发球机稳定控制系统, 通过稳定直流有刷电机的转速, 从而使得每一个被发射的乒乓球, 出球速度保持一致。首先利用 Matlab/Simulink 工具箱搭建仿真平台, 验证模糊 PID 较传统 PID 算法具有更佳的控制性能, 然后以 STM32 微处理器为核心, 霍尔编码器检测出球电机转速, 上球电机补偿出球电机转速。设计并实现了基于模糊 PID 算法的硬件实验电路。实验结果表明, 相较于传统 PID 算法, 乒乓球落点误差可以精确在 ± 7.0 cm, 提高了 22%, 乒乓球出球电机响应速度由 4.7 s 降低到了 1.66 s, 受到干扰时, 系统达到稳定的时间由 1.76 s 降低到 1.64 s。

关键词: 单片机; 模糊 PID; 自动化技术

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0033-08

Study on table tennis tee control system based on adaptive fuzzy PID

TANG Yulong^{1,2}, FU Meng^{1,2}, ZHANG Haotian^{1,2}, CAO Gang^{1,2}, LIU Feiyu^{1,2}, WANG Yuzhe^{1,2}

(1 School of Electromechanical Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116650, Liaoning, China;

2 Key Laboratory of Big Data Application Technology of the National Civil Affairs Commission, Dalian Minzu University, Dalian 116650, Liaoning, China)

Abstract: This paper designs an adaptive fuzzy PID-based stability control system for ping pong ball launchers to stabilize the speed of DC brushed motor so as to keep the speed of each launched ping pong ball at the same speed. The simulation platform is firstly built using Matlab/Simulink toolbox to verify that the fuzzy PID has better control performance than the traditional PID algorithm, and then the STM32 microprocessor is used as the core, the speed of the ball launcher motor is detected by the Hall encoder, and the speed of the ball launcher motor is compensated by the upper ball motor. The hardware experimental circuit is designed and implemented based on the fuzzy PID algorithm. Compared with the traditional PID algorithm, the experimental results show that the final ping pong ball landing error can be accurately increased by 22% at 7.0 cm, the ping pong ball motor response speed is reduced from 4.7 s to 1.66 s, and the system stabilization time is reduced from 1.76 s to 1.64 s when disturbed.

Key words: MCU; fuzzy PID; automatic control technology

0 引言

乒乓球发球机的设计主流是由上球直流电机、出球直流电机、转角步进电机共同组合而成。其中, 出球直流电机的转速将会极大地影响到发球机发射乒乓球时发射落点的精度。目前, 最为常见的直流电机转速控制方法为比例-积分-微分法, 即系统输入已知偏差, 在进行对应的比例、积分、微分函数关系运算后, 即由运算结果控制输出。而因为 PID 控制器设计简单, 在工业应用中占比超过

90%^[1]。在使用 PID 控制器结合实际应用方面, 国内外学者使用 PID 算法解决了许多问题, 万海霞等学者^[2]将模糊 PID 控制应用于双侧闸门变速跟随控制, 使用 PLC 来控制闸门的开启速度。罗一等学者^[3]通过驱动工业空调运用模糊 PID 算法实现对酒醅表面温度的精确控制。

随着电子信息技术和智能化控制技术的快速发展, 传统的 PID 控制已经无法满足工业设计的要求。考虑到传统 PID 控制无法自适应工况的变化, 并且在实际工作环境中难以调节修改参数, 因此, 大

作者简介: 唐宇龙(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 控制工程。

通讯作者: 汪语哲(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 人工智能, 信息融合。Email: 124478369@qq.com

收稿日期: 2023-06-16

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

多情况下常将其作为控制算法的底层,与模糊控制、专家系统和神经网络技术等智能控制相结合,形成智能PID算法,用于满足不同控制系统的要求。其中,模糊控制不需要依赖被控对象的精确数学模型,通过专家经验法,即可实现对可控对象的稳定控制。对于诸多不确定性和随机性的复杂控制系统,模糊控制可以提高系统动态性能,从而达到更好的控制效果。本文针对乒乓球发球机直流电机控制系统的时变性、非线性、滞后性、耦合性等复杂问题,将模糊控制与PID算法结合,设计基于自适应模糊PID的乒乓球发球机稳定控制系统,采用两输入三输出的二维模糊控制器动态调节PID参数,进而稳定控制发球机系统。首先确定隶属度函数和模糊规则,其次选定去模糊化的方法,而在推定了系统的传递函数后,使用Matlab/Simulink模块搭建模糊PID算法控制系统,再对其进行仿真验证。最后,则以STM32为主控芯片,结合直流电机和驱动电路构建硬件电路平台^[4],进行实验验证。

1 模糊PID算法设计与建模仿真

1.1 模糊PID算法设计

模糊PID通过检测系统的实时偏差 $e(t)$,以及误差变化率 $\Delta e(t)$ 作为模糊控制器的输入量,通过模糊推理进而实现模糊PID参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的在线修改,控制性能优于传统的PID控制算法。控制结构^[5-7]如图1所示。

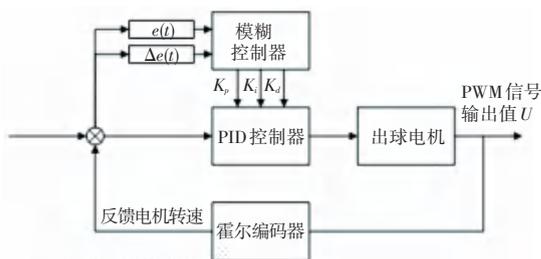


图1 模糊PID控制结构图^[5-7]

Fig. 1 Fuzzy PID control structure diagram^[5-7]

图1中, $e(t)$ 为出球电机期望速度和实际电机速度的偏差, $\Delta e(t)$ 为误差的变化率, U 为模糊控制器计算后得到的最终输出量。其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示比例控制因子、积分控制因子、微分控制因子。对此拟做研究阐释如下。

(1) 比例控制因子 K_p :在PID控制中,比例项的作用是使输出与误差成正比例关系,因此当误差较大时,比例项的输出也会相应地增加,从而加快系统的响应速度。比例控制因子的值过大,系统可能

会发生振荡或不稳定的情况。

(2) 积分控制因子 K_i :积分项的作用是对误差进行积分,将误差历史的累积值作为控制器的输出,从而使控制器的输出值随着时间的推移而逐渐增加或减少。如果系统存在稳态误差,积分控制器的输出会不断积累,直到稳态误差被消除为止。积分控制因子 K_i 的取值需要根据具体的系统特性和性能要求进行仿真测试和调整。积分控制因子 K_i 越大,系统对稳态误差的校正能力越强,但也会导致系统的响应速度变慢,系统的稳定性也会受到影响。

(3) 微分控制因子 K_d :微分控制的作用是根据误差的变化率来调节控制器的输出,使控制器的输出值随着误差变化的速率而增加或减少。微分控制可以根据误差的变化率来调节控制器的输出,以实现系统的阻尼控制,起到抑制系统振荡的作用。同时需要考虑系统的动态特性和性能指标,避免微分控制器对于噪声和微小变动的过度响应。

1.2 PID控制器

PID控制器是一种常见的控制器,由比例控制项、积分控制项和微分控制项三部分组成,用于控制一个系统的输出,使其达到一个期望值或者跟随一个参考信号而发生变化。PID控制的计算公式可写为:

$$U(t) = K_p(t) \cdot e(t) + K_i(t) \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d(t) \cdot \Delta e(t) \quad (1)$$

其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示比例控制因子、积分控制因子、微分控制因子; $e(t)$ 表示期望电机速度与实际电机速度的偏差; $\Delta e(t)$ 表示偏差变换率; $U(t)$ 表示最终输出; t 表示时间系数。

1.3 模糊控制器

模糊控制器是一种基于模糊逻辑的控制器,能够处理具有模糊性质的输入变量和输出变量,对于某些非线性、不确定或难以建模的控制问题具有一定的优势^[8]。模糊化,将输入变量转化为模糊变量,即将其映射到一组模糊集合中,每个模糊集合都由一个隶属度函数来描述。隶属度函数表示了输入变量与该模糊集合之间的隶属程度。

结合实际情况^[9],对 $e(t)$ 、 $\Delta e(t)$ 、 K_p 、 K_i 、 K_d 进行模糊化处理。定义 $e(t)$ 、 $\Delta e(t)$ 、 K_p 、 K_i 、 K_d 的物理论域分别为 $[-250, 250]$ 、 $[-250, 250]$ 、 $[0, 2.4]$ 、 $[0, 0.06]$ 、 $[0, 6]$ 。与此同时,将输入模糊论域设为 $[-15, 15]$,输出模糊论域设为 $[0, 12]$ 。因此可得到 $e(t)$ 、 $\Delta e(t)$ 的量化因子均为16、 K_p 、 K_i 、 K_d 的量化

因子分别为 5、200、2。

本文两输入三输出的模糊控制器, 系统的输入变量为偏差 $e(t)$ 以及偏差变化率 $\Delta e(t)$ 。根据专家经验制定模糊规则, 最后输出变量 K_p, K_i, K_d 。采用 7 个模糊子集对每个模糊论域进行计算, 偏差变化量 $e(t)$ 和偏差变化率 $\Delta e(t)$ 的模糊子集均为 {负大[NB]、负中[NM]、负小[NS]、零[ZO]、正小[PS]、正中[PM]、正大[PB]}。前后件隶属度函数均采用三角隶属度函数, 基本论域映射模糊论域使用非等间距映射, 采用加权平均法计算最后的输出。接下来,

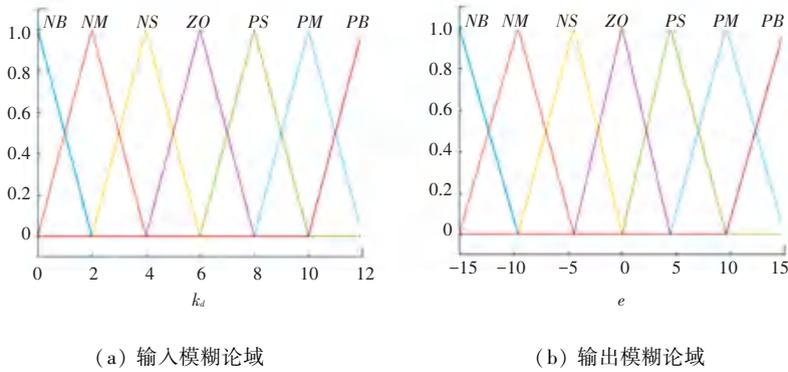


图 2 隶属度函数曲线

Fig. 2 Affiliation function curves

(2) 模糊推理: 根据一组模糊规则, 对模糊变量进行推理, 生成一组模糊输出变量。模糊规则由一个前件和一个后件组成。前件由输入变量的模糊集合组成, 后件由输出变量的模糊集合组成, 根据前件的隶属度和模糊规则的权重, 使用模糊推理方法计算出后件的隶属度。文本采用 IF A AND B THEN C.... 的形式。根据专家经验法建立模糊规则见表 1, 输入变量和输出变量的对应关系如图 3 所示。由前件命题中的输入变量 $e(t)$ 以及输入变量 $\Delta e(t)$

将展开研究论述如下。

(1) 模糊化: 将输入变量转化为模糊变量, 即将其映射到一组模糊集合中, 每个模糊集合都由一个隶属度函数来描述。隶属度函数表示了输入变量与该模糊集合之间的隶属程度。由于三角隶属度函数具有较好的适应性和泛化能力, 可以适用于不同类型的控制系统, 本文隶属度函数均采用三角隶属度函数, 如图 2 所示。基本论域映射至模糊论域采用非等间距映射。

和其相对应的三角隶属度函数计算得到模糊控制器的前件隶属度, 将前件隶属度带入模糊规则得到后件隶属度。采取最大值隶属度法计算模糊输出结果。得到模糊输出结果后通过加权平均法进行去模糊, 最终得到实际输出。这里用到的公式为:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i a_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i} = \frac{\omega_1 a_1 + \omega_2 a_2 + \dots + \omega_k a_k}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_k} \quad (2)$$

表 1 模糊规则
Table 1 Fuzzy rules

$\Delta e(t)$	$e(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/NB	PS/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/NS/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/ZO
NS	PB/NM/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	ZO/NS/NM	ZO/ZO/NM	NS/PS/NS	NS/PS/NS
ZO	PM/NM/ZO	PM/NS/NS	PS/ZO/NS	ZO/ZO/NS	ZO/PS/NS	NM/PS/NS	NM/PM/NS
PS	PS/NS/PS	PM/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/PB	PS/ZO/PS	ZO/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS
PB	ZO/ZO/PB	ZO/PS/PB	NS/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PM	NB/PM/PS	NB/PB/PB

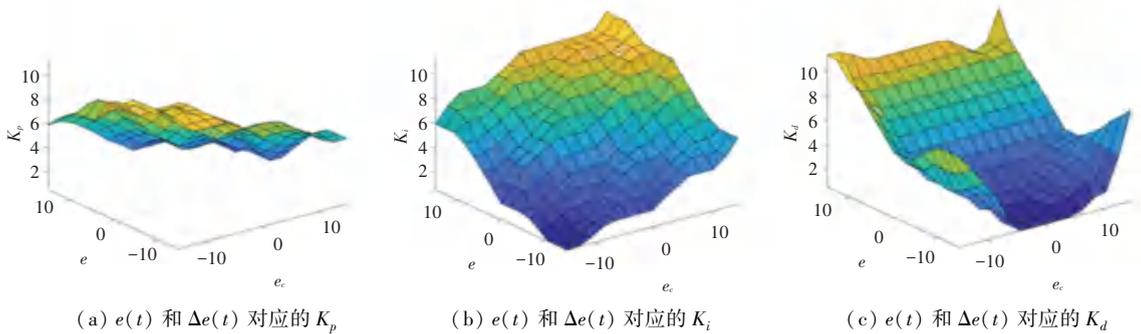


图3 输入变量和输出变量的对应关系

Fig. 3 Correspondence between input and output variables

(3) 去模糊: 将模糊输出变量映射到实际输出变量上, 这里考虑的加权平均法去模糊存在计算速度快、易于调整、稳定性好等特点, 所以采用加权平均法进行去模糊化。得到后件的输出 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 。最终根据系统确定 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ 的权重, 通过式(3)^[10] 得到最终的对应实际输出 V 。

的稳定性, 使发球机在发球时, 发球的精度也随之得到了提高。继而, 文中做出剖析论述如下。

2 基于模糊控制算法的嵌入式三电机同步控制

2.1 系统构成

本文采用的嵌入系统主要包括 STM32F407ZGT6 单片机, 直流电机驱动, 12 V 5 A 直流电机, 12 V 3 A 直流电机, 霍尔传感器。作为乒乓球发球机出球直流电机, 最高转速可达 12 500 RPM, 霍尔传感器主要负责检测 12 V 5 A 出球电机实时速度。使用 12 V 3 A 的直流电机作为乒乓球发球机上球电机。

2.2 电机同步控制

当发球机进行发球时, 出球电机的摩擦轮如图 4 所示。在接触乒乓球时, 出球电机的转速会受到影响, 导致发球机的转速不稳定, 进而使得发球机进行乒乓球发球时, 发球位置不准。针对这一情况, 本文采用模糊 PID 控制器对出球电机进行控制, 从而大大降低这一情况带来的影响。在此基础上可根据乒乓球的出球规律, 当乒乓球出球电机受到摩擦轮的阻力影响的同时增大上球电机的速度, 对正在上球的乒乓球赋予一部分推力, 结果在原本的基础上又一次降低了出球电机的转速误差, 从而进一步提高了出球电机

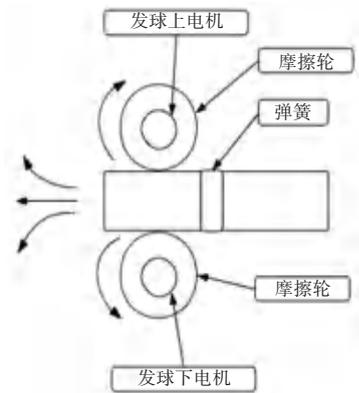


图4 发球机出球口俯视图

Fig. 4 Top view of ball outlet of tee

(1) 出球电机控制发球速度以及发球种类。发球机出球电机的速度会受到摩擦轮的阻力影响如图 5 所示, 从而导致出球电机满足不了期望的控制速度, 这里采用模糊 PID 控制器控制出球电机转速, 用来确保出球电机的稳定性。发球机控制发球以过乒乓球台网为例, 当出球上电机速度满足至少 2 倍的出球下电机速度时, 发球机发射上旋球; 出球下电机的速度满足至少 2 倍, 发球机发射下旋球; 当出球上电机速度和出球下电机速度满足 1 : 1 时, 发球机发射直球。同时调整出球电机在空间中的位置, 即可控制发球机发射旋球的种类。如左旋球、右旋球、侧旋球等。



(a) 上下旋球

(b) 左右旋球

(c) 侧旋球

图5 发球机发射旋球种类

Fig. 5 Types of spin balls launched by tee machines

(2) 上球电机补偿发球机发球速度。通过采用模糊 PID 控制器稳定出球电机转速, 这里使用上球电机进一步补偿发球机的发球速度。霍尔编码器检测到偏差 e , 偏差变化率 Δe , 根据偏差 e , 偏差变化率 Δe 的数值增大或者减小上球电机的占空比, 从而控制上球电机的转速。上球电机补偿发球机发球速度流程如图 6 所示。这里, 采用乘积项 P 来增大、减小上球电机的占空比。通过占空比控制上球电机转速以及模糊 PID 控制所调整的输出球电机转速来共同精准地控制发球机的发球速度。

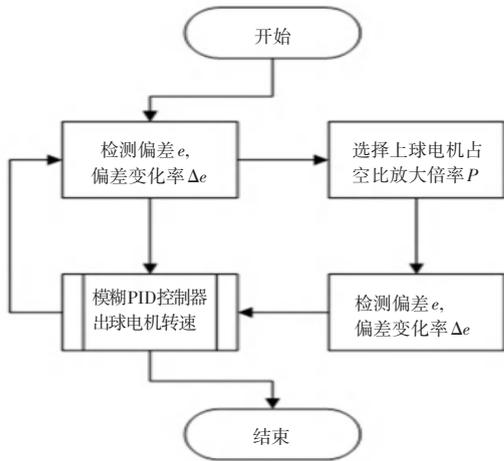


图 6 上球电机补偿发球机发球速度

Fig. 6 The upper ball motor compensates the speed of the ball launcher motor

3 系统建模与仿真

当设计乒乓球发球机时, 有刷直流电机被选为电机类型, 因为有刷直流电机具有较高的起动扭矩和良好的调速性能, 可以通过控制电机的转速和方向来控制乒乓球的出球速度和方向。考虑到工业设计中的成本问题, 有刷电机具有成本较低、以及便于维护的特点, 最终选用有刷直流电机作为发球机的出球电机以及上球电机。

3.1 系统建模

为方便使用 Matlab 进行仿真验证, 这里给出了有刷直流电机的传递函数模型的数学公式为^[11]:

$$H(s) = \frac{K_r}{L_a J s^2 + (L_a B + R_a J) s + K_e K_r + R_a B} \quad (3)$$

其中, R_a 、 L_a 、 K_r 、 B 、 K_e 分别表示电机的电阻值、电枢电感、转矩常数、阻尼系数、反电动势系数; J 表示系统转动惯量。

3.2 系统仿真

根据不同型号的直流有刷电机求得系统的传递

函数, 这里使用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建传统 PID 控制器和模糊 PID 控制器的仿真控制模型(如图 7 所示)。

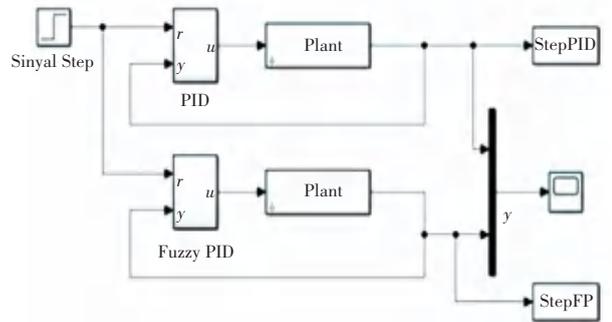


图 7 Simulink 仿真

Fig. 7 Simulink simulation

最终仿真证明模糊 PID 控制器相比传统 PID 控制器具有更快的响应速度, 并且拥有更小的超调量。仿真响应曲线如图 8 所示。相对于传统 PID 控制器, 模糊 PID 控制器具有更强的适应性、鲁棒性、精度和可解释性。模糊 PID 控制器可以根据实时反馈自动调整控制参数, 适应不同的工况和控制要求; 可以处理非线性、时变和不确定性系统, 表现出更好的鲁棒性和容错性; 可以通过模糊化输入和输出, 对系统进行更加精准的控制, 提高控制精度和系统响应速度; 同时可以通过语言变量和规则库来描述控制策略, 使得控制器的工作原理更加直观和易于理解。

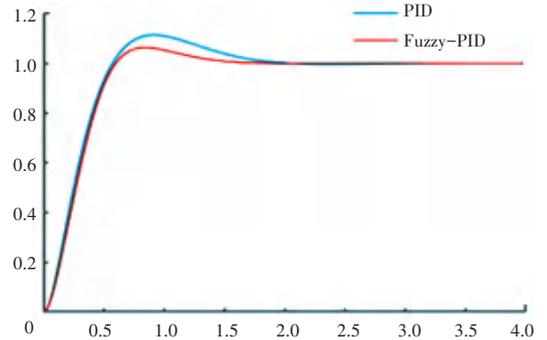


图 8 仿真响应情况

Fig. 8 Simulated response

4 电路搭建

4.1 主控单元电路

主控制器是整个系统的核心, 除了对各个外设进行控制以外, 还作为整个系统的信号交互平台, 负责完成各个外设的信号交互, 从而实现算法应用。本文考虑到成本和运算能力等方面, 采用以 Cortex-M4 为架构的 STM32407ZGT6 作为主控制器。STM32F407ZGT6 芯片的最小系统控制电路如图 9 所示。

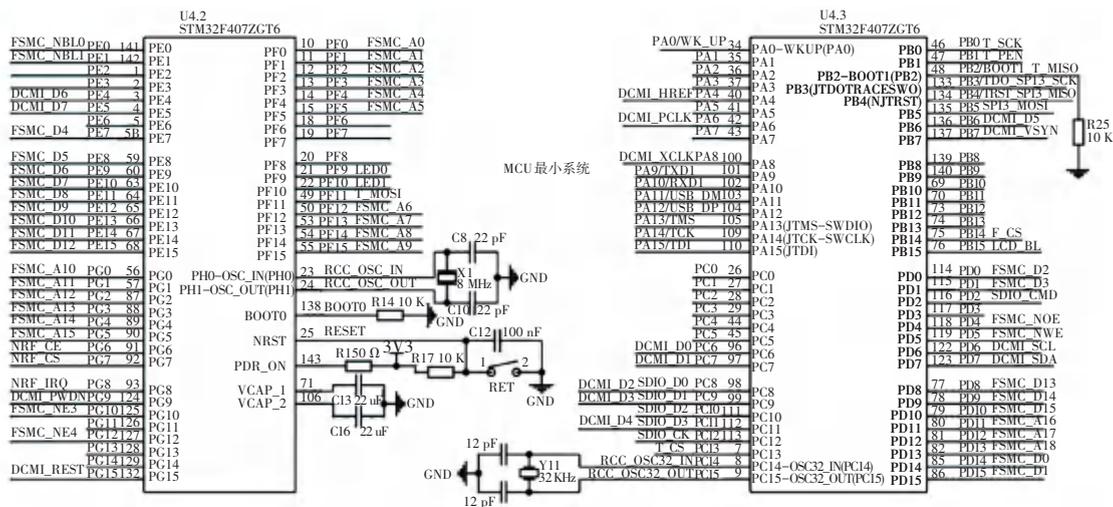


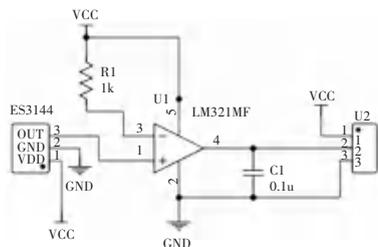
图 9 MCU 最小系统

Fig. 9 MCU minimum system

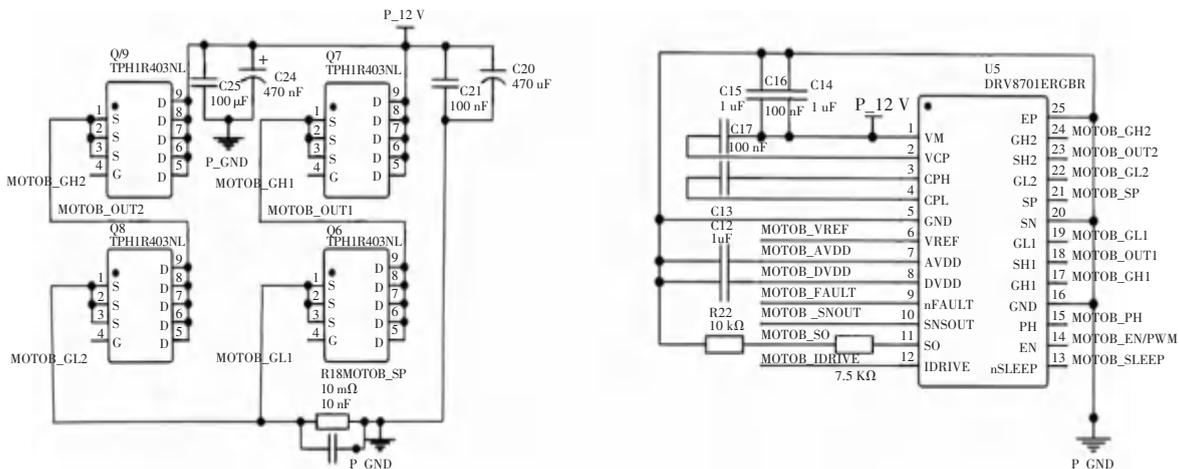
4.2 速度检测与驱动电路

速度检测中,本文采用的核心芯片为 ES3144 霍尔传感器。霍尔传感器模块上的 LM393 运放芯片用来将 ES3144 霍尔传感器产生的模拟信号整形成数字方波信号。参考电路如图 10 所示。当电机每转一圈时,套在电机转动轴上的感应磁环的 S 极和 N 极会分别靠近一次 ES3144,在此过程中霍尔传

感器会根据磁极的远近产生一个类似正弦波的信号,然后经过霍尔传感器模块上的 LM393 运放芯片的整形处理后生成一个周期的数字方波信号。研究中可以通过统计在每秒或每分钟生成方波信号的个数即可得出电机的转速。发球机的出球电机主要是由 H 桥驱动电路以及驱动芯片 DRV8701ERGER 构成。



(a) 速度检测电路



(b) H 桥驱动电路

图 10 速度检测与驱动电路

Fig. 10 Speed detection and drive circuit

5 实验测试与结果分析

本次仿真实验分别使用了使用传统 PID 算法和模糊 PID 算法, 在使用相同的期望输出下, 对比了系统的响应情况如图 11 所示。可以发现期望输出相同的情况下, 模糊 PID 控制器在控制摩擦轮转速达到稳定时, 上升时间相较于传统 PID 控制器,

由 760 ms 降低为 260 ms; 当稳态误差范围规定在 ± 10 以内, 响应时间由 4 700 ms 降低为 1 660 ms; 在系统受到摩擦轮摩擦力干扰时, 系统达到稳定的时间相较于的传统 PID 算法, 由 1 764 ms 下降到 1 140 ms。由此可见使用模糊 PID 控制器可以使出球电机的转速的稳定性得到显著改善。

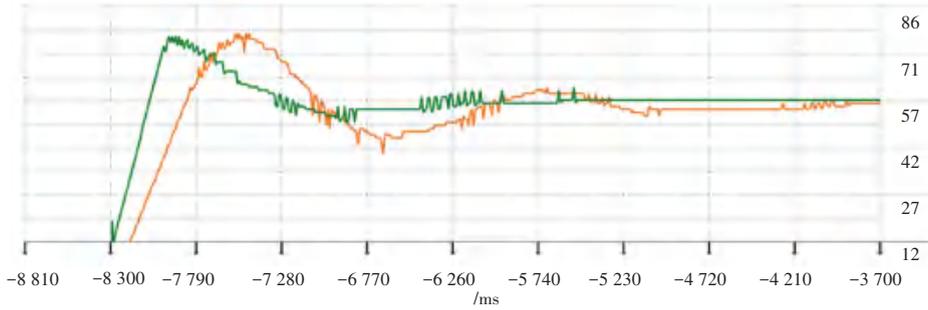


图 11 模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器实际响应情况

Fig. 11 Actual response of fuzzy PID controller and traditional PID controller

当出球电机在旋转摩擦轮进行出球时, 模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器抗干扰曲线则如图 12 所示。研究可知, 乒乓球对于摩擦轮的阻力会影响出球电机的转速, 从而使得发球机发射乒乓球位置不够精确。为了验证以上结论, 本文分别使用模糊 PID 控制器以及传统 PID 控制器, 在出球电机进

行出球时, 观察出球电机的期望输出速度的变化, 这样就可以进行结果对比。由图 12 可知, 当出现扰动信号时, 出球电机会在最快速的时间内稳定自身的转速, 同时还会观察到模糊 PID 控制器的抗干扰能力将明显大于传统 PID 控制器。

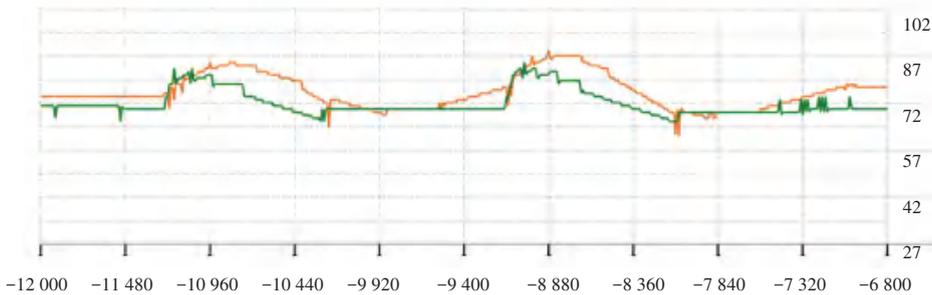


图 12 模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器抗干扰图

Fig. 12 Anti-interference graph of fuzzy PID controller and traditional PID controller

系统外部输入电源电压为 12 V, 最大输出电流为 5 A, 期望输出为发球机发射下旋球, 落点位置为乒乓球台桌 D, E, C 区域的中心点, 发球机发射区域示意如图 13 所示。仿真时, 分别向主控芯片中烧写传统 PID 程序、模糊 PID 程序, 进行发球机精准发球控制程度的对比实验。发球机的输入量使用 UART 与上位机进行通信输入。落点精度对比见表 2。分析表 2 可以发现旋球相较于直球具有更小的落点误差。

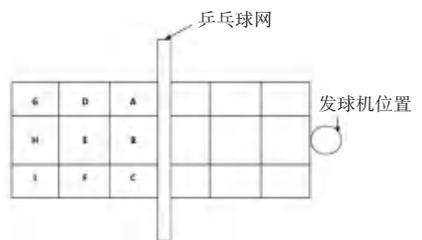


图 13 发球机发射区域示意图

Fig. 13 Diagram of the launched area of the tee

表2 落点精度对比表

Table 2 Comparison table of falling point accuracy

发球区域	控制算法	发球种类	性能指标			最小误差/cm
			发球总数	平均误差/cm	最大误差/cm	
D 区域	传统 PID	直球	20	8.53	13.91	0.89
		下旋球		6.52	7.53	0.69
	模糊 PID	直球	20	6.72	10.56	0.85
		下旋球		4.72	6.53	0.59
E 区域	传统 PID	直球	20	8.32	14.61	0.87
		下旋球		6.32	7.32	0.67
	模糊 PID	直球	20	6.32	10.31	0.75
		下旋球		4.32	6.33	0.56
F 区域	传统 PID	直球	20	8.62	13.61	0.97
		下旋球		6.82	7.33	0.77
	模糊 PID	直球	20	6.32	11.31	0.78
		下旋球		4.32	6.23	0.46

6 结束语

本文研究了乒乓球发球机出现发球不准的问题。针对这一问题,采用了模糊 PID 控制器来降低发球机发球时的落点误差。为了验证模糊 PID 控制器的有效性,研究对比了市面上使用的传统 PID 控制器的乒乓球发球机。实验结果表明,模糊 PID 控制器的鲁棒性显著优于传统 PID 控制器,并且落点误差精准控制在 7.0 cm 以内,解决了实际问题。传统 PID 控制器是一种经典的控制器,是通过对系统的误差、偏差和积分进行反馈控制,来实现对系统的精准控制。然而,传统 PID 控制器存在着对噪声和干扰的敏感性,容易出现震荡和不稳定的现象,从而导致发球不准的问题。相比之下,模糊 PID 控制器采用模糊逻辑进行控制,具有更强的鲁棒性和抗干扰能力。模糊 PID 控器能够自适应地调整控制参数,根据实际情况对控制信号进行同步优化,从而实现对系统的精准控制。实验结果表明,模糊 PID 控制器能够有效地降低发球机发球时的落点误差,提高发球机的精准度和稳定性。

参考文献

- [1] 张中卫,杨彦奇,杨海坤. 基于自适应模糊 PID 的输液温度控制系统研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(3):137-145.
- [2] 万海霞,马慧卿. 基于模糊 PID 控制的船闸闸门同步控制器设计与仿真[J]. 水运工程,2023(4):174-179.
- [3] 罗一,石艳. 基于模糊 PID 控制的窖池温度监控设计[J]. 食品与机械,2023,39(3):85-90.
- [4] 刘冠艳. 基于 STM32 的有刷直流电机模糊 PID 调速系统设计[J]. 电子测量技术,2018,41(22):125-128.
- [5] 黄薛凯,鲁植雄,陈雷,等. HMCVT 泵控马达系统模糊 PID 控制研究[J]. 江西农业大学学报,2023,45(1):189-201.
- [6] 闫臣攀,赵勇,侯鹏,等. 悬浮气垫重力补偿装置模糊 PID 控制系统设计[J]. 机械设计与研究,2022,38(5):142-147.
- [7] 翁红,王邦继,杨喆,等. 适应于微型直流电机的模糊 PID 控制器 FPGA 实现[J]. 电力电子技术,2022,56(9):50-53.
- [8] WANG Weijian, ZHANG Yonghong, MAO Peng, et al. Simulation research on voltage control of buck converter based on MIT MRAC scheme[J]. Information and Control,2016,45(4):456-462.
- [9] 徐托,瞿少成,王安,等. 基于模糊 PID 的室内空气质量测控系统[J]. 电子测量技术,2022,45(7):62-67.
- [10] 王君. 基于模糊控制策略的温室远程智能控制系统的研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [11] 刘延飞,彭征,王艺辉,等. 基于改进的遗传算法的有刷直流电机 PID 参数整定[J]. 计算机应用,2022,42(5):1634-1641.